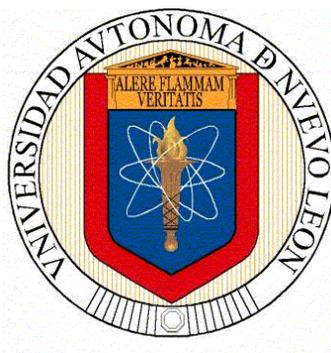


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**RECUPERACIÓN DE ARENA DE SÍLICE RECUBIERTA CON
SILICATO DE SODIO PARA PRODUCIR CORAZONES DE ARENA
MEDIANTE EL PROCESO DE CAJA FRÍA**

POR

ALDO ALBERTO SÁENZ VALDEZ

TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA DE
MATERIALES**

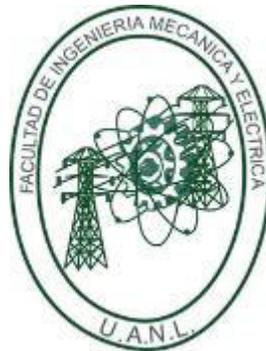
CIUDAD UNIVERSITARIA

ENERO DE 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



RECUPERACIÓN DE ARENA DE SÍLICE RECUBIERTA CON
SILICATO DE SODIO PARA PRODUCIR CORAZONES DE ARENA
MEDIANTE EL PROCESO DE CAJA FRÍA

POR

ALDO ALBERTO SÁENZ VALDEZ

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA DE
MATERIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA

ENERO DE 2021



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "Recuperación de arena de sílice recubierta con silicato de sodio para producir corazones de arena mediante el proceso de caja fría", realizada por el alumno Aldo Alberto Sáenz Valdez, con número de matrícula 1110845, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería de Materiales.

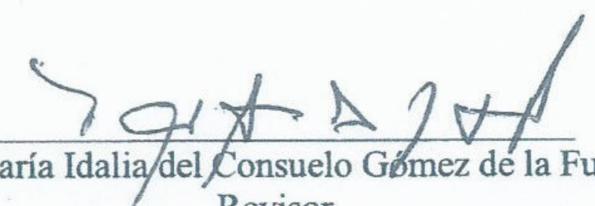
El Comité de Tesis



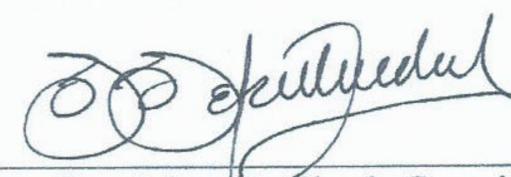
Dr. Rafael Colás Ortiz
Director



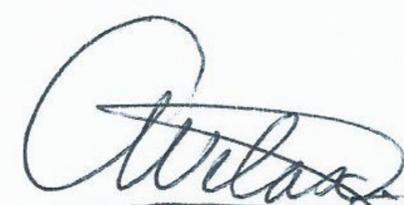
Dr. Fernando Morales Rendón
Revisor



Dra. María Idalia del Consuelo Gómez de la Fuente
Revisor



Dra. Selene Sepúlveda Guzmán
Revisor



Dr. Abraham Velasco Téllez
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, febrero de 2021



Ciudad Universitaria Pedro de Alba s/n, C.P. 66455. A.P. 076 Suc. "F"
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tels: (81) 8332 0903 /
Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904

DEDICATORIA

A mis padres:

Jaime Sáenz Rangel
Alma Rosa Valdez Rodríguez

A mis hermanos:

Alan Alejandro Sáenz Valdez
Karlenne Seareth Sáenz Valdez

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

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional y amor.

Al Consejo Nacional del Ciencia y Tecnología por apoyar a la ciencia y a los investigadores mexicanos.

A la empresa Nematik por darme la oportunidad de realizar este proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por darme la oportunidad de brindarme mis estudios de licenciatura, maestría y doctorado.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz por su apoyo y disponibilidad para la realización de esta tesis, así como su paciencia para su revisión.

Al Dr. José Talamantes por darme la oportunidad de trabajar en esta grandiosa empresa y así poder realizar mi tesis de doctorado.

Al Dr. Abraham Velasco por su amistad y apoyo en la realización de este proyecto, además por compartirme sus conocimientos.

Mi aprecio a los sinodales: Dra. Idalia Gómez de la fuente, Dr. Fernando Morales y Dra. Selene Sepúlveda por su apoyo en la revisión y asesoría de mi trabajo.

A mis compañeros de Nematik: Juan Pablo, Jorge, Miguel, Fernando, Alejandro, Efrén, Lázaro, “Flaco”, Pablo y a todos mis amigos y colegas que han pasado por esta compañía.

ÍNDICE

	Página
Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Índice	iii
Resumen	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Arenas de fundición	6
2.1.1 Definición	6
2.1.2 Origen	7
2.1.3 Tipos de arena para fundición	8
2.1.4 Propiedades fisicoquímicas de las arenas	12
2.2 Sistemas de aglutinación química	17
2.2.1 Clasificación de los sistemas de aglutinación	19
2.3 Proceso de caja fría	21
2.3.1 Sistema fenólico-uretánico	23
2.3.2 Poliuretanos	25
2.4 Proceso de caja caliente	26
2.4.1 Sistema de resinas de caja caliente	27
2.5 Proceso Shell	28
2.6 Proceso de caja caliente con sistemas orgánicos solubles en agua	29
2.6.1 Aglutinante base proteínas	30
2.6.2 Aglutinante base polisacáridos	30
2.7 Proceso con sistemas inorgánicos	31
2.7.1 Generalidades y ventajas	32
2.7.2 Clasificación de los sistemas inorgánicos	34
2.7.3 Silicatos y sus propiedades	34
2.7.4 Procesos base silicatos	39

2.7.5 Avances recientes en la tecnología de arena con silicato	42
2.7.6 Aglutinantes base fosfatos y sus procesos	45
2.7.7 Aditivos usados en sistemas inorgánicos	46
2.8 Tendencia en el desarrollo de aglutinantes para corazones y moldes de arena	46
2.9 Fundamentos de corazones y moldes de fundición	52
2.9.1 Propiedades de los corazones y mezclas de arena-resina	54
2.10 Recuperación de la arena	55
2.10.1 Beneficios de la recuperación	56
2.10.2 Tipos de recuperación	57
2.10.3 Recuperación de la arena con silicato de sodio	63
Referencias	70
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	76
3.1 Introducción	76
3.2 Caracterización de las arenas	79
3.2.1 Distribución granulométrica	80
3.2.2 Morfología	82
3.2.3 Medición de pH y ADV	85
3.3 Caracterización de los aglutinantes	86
3.3.1 Viscosidad	87
3.3.2 Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier	87
3.3.3 Análisis Termogravimétrico	88
3.4 Recubrimiento de arena con silicato de sodio	89
3.4.1 Curado por caja caliente	90
3.4.2 Procedimiento para elaboración de arena recubierta con silicato	91
3.5 Métodos de recuperación	93
3.5.1 Recuperación química	94
3.5.2 Recuperación mecánica	98
3.5.3 Recuperación acuosa	101

3.6 Fabricación de probetas por el proceso de caja fría	105
3.6.1 Procedimiento de mezclado arena-resina	106
3.6.2 Caja fría	106
3.7 Ensayos mecánicos	107
3.7.1 Propiedades mecánicas	107
3.7.2 Distorsión en caliente	111
Referencias	115
4. RESULTADOS	116
4.1 Introducción	116
4.2 Caracterización de las arenas	116
4.2.1 Distribución granulométrica	116
4.2.2 Morfología	118
4.2.3 Medición de pH y ADV	119
4.2.4 Composición química	120
4.3 Caracterización de los aglutinantes	121
4.3.1 Viscosidad y pH	121
4.3.2 Espectroscopía de infrarrojo por Transformada de Fourier	122
4.3.3 Análisis termogravimétrico	124
4.4 Recuperación química	127
4.4.1 Desarrollo de resistencia mecánica y vida de banco	131
4.5 Recuperación mecánica	139
4.5.1 Desarrollo de resistencia y vida de banco	144
4.6 Recuperación acuosa	145
4.6.1 Desarrollo de resistencia y vida de banco	150
4.7 Ensayos mecánicos	153
4.7.1 Desarrollo de resistencia a 0.0, 2.0 y 24.0 h a condiciones de baja y alta humedad relativa	155
4.7.2 Distorsión en caliente	157
Referencias	162
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	163
5.1 Introducción	163

5.2 Caracterización de los materiales	163
5.2.1 Efecto del tipo de arena usada para las pruebas de recuperación	163
5.2.2 Efecto del tipo de aglutinante inorgánico usado para las pruebas de recuperación	165
5.3 Recuperación química	167
5.3.1 Efecto del ácido fosfórico en la recuperación de la arena y propiedades mecánicas	167
5.3.2 Efecto de otros ácidos en la recuperación de la arena y propiedades mecánicas	168
5.4 Recuperación mecánica	169
5.4.1 Efecto de la atrición mecánica de la arena en sus propiedades	170
5.5 Recuperación acuosa	172
5.5.1 Efecto del lavado en el pH de la arena y sus propiedades mecánicas	172
5.6 Ensayos mecánicos	178
5.6.1 Efecto de la humedad en las propiedades mecánicas	178
5.6.2 Efecto del lavado en la morfología de la arena	179
5.6.3 Distorsión y resistencia en caliente	181
Referencias	182
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	183
6.1 Conclusiones	183
6.2 Recomendaciones	185
ÍNDICE DE FIGURAS	186
ÍNDICE DE TABLAS	191
APÉNDICES	
Apéndice A	194
Apéndice B	199

RESUMEN

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos de la investigación realizada con la finalidad de obtener un método de recuperación de la arena de sílice recubierta de silicato de sodio del proceso inorgánico para la fabricación de corazones de arena mediante el proceso orgánico de caja fría (cold box).

En el capítulo 2 se presenta un extenso estudio del arte de las características de las arenas y resinas que se emplean en la fabricación de corazones y moldes de fundición, así como sus principales procesos de manufactura y sus avances tecnológicos más recientes. Además de esto, se realiza una profunda revisión bibliográfica sobre los métodos de recuperación o reciclaje de la arena usada para la fabricación de corazones provenientes de los procesos orgánicos e inorgánicos, especialmente aquellos donde se usó silicato de sodio como sistema de aglutinación química.

En el capítulo 3 se mencionan los materiales y equipos usados para la experimentación de este trabajo, las características físicas y químicas de los reactivos y materiales usados, así como sus propiedades mecánicas y térmicas, especialmente de las arenas y aglutinantes usados. Además de esto, se mencionan los ensayos mecánicos y térmicos usados para evaluar las propiedades de las probetas con la arena recubierta de sodio previamente recuperada. Los principales ensayos son: desarrollo de resistencia a la tensión, vida de banco, y distorsión y resistencia en caliente (BCIRA por sus siglas en inglés).

Se usaron tres relaciones de arena recubierta con silicato de sodio mezclada con arena de proceso (arena del proceso industrial usada como muestra testigo): 75:25, 50:50 y 25:75. Se determinaron este tipo de mezclas con la finalidad de ver la factibilidad de usar parcialmente la arena recuperada previamente recubierta con silicato, ya que usar 100% de arena recuperada previamente recubierta con silicato para fabricar corazones por el proceso de caja fría pudiera resultar con propiedades mecánicas lo suficientemente no altas. Hacer “diluciones” de la arena de proceso con esa arena recuperada es muy factible a nivel de manufactura.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de las arenas y aglutinantes usados; los resultados de propiedades mecánicas de los procesos de recuperación química, mecánica y acuosa (lavado); y los ensayos mecánicos realizados para el mejor método de recuperación de la arena recubierta con silicato de sodio. Para las pruebas con los distintos métodos de recuperación, las principales variables respuestas fueron los valores de pH (con el objetivo de obtener valores de pH de entre 7 a 9) y las propiedades mecánicas, en caso de poder lograr reducir el valor de pH.

En el método de recuperación química se usaron 8 distintos ácidos a diferentes concentraciones con el fin de reducir el pH de la arena recubierta con silicato de sodio y así fabricar probetas por el proceso de caja fría. El ácido que logró no solo reducir el pH, sino obtener valores de propiedades mecánicas y vida de banco fue el ácido fosfórico. Sin embargo, la relación de arena recubierta con silicato con la arena de proceso 75:25 no desarrolló resistencia.

En cuanto al método de recuperación mecánica, se evaluaron distintas presiones y tiempos de atrición. En este proceso de atrición mecánica, fue necesario la eliminación de los finos formados por este proceso, ya que el silicato de sodio, posiblemente removido por la atrición, queda en forma de partículas muy finas. En ninguno de los experimentos fue posible la reducción de los

valores de pH, por lo que no fue necesario la evaluación de propiedades mecánicas.

Referente al proceso de recuperación acuosa o por lavado, se usaron tres tipos de métodos diferentes: lavado con agua fría (temperatura ambiente de 25°C), agua caliente (a ebullición) y lavado con una solución ácida (HCl 0.1N). En los tres métodos se realizó un lavado y dos enjuagues. Para los tres métodos, los valores de pH se lograron reducir al segundo ciclo de enjuague con valores de entre 7.4 a 8.6. Los mejores valores de desarrollo de resistencia a la tensión y vida de banco fueron aquellos usando agua fría y caliente.

Teniendo el método de recuperación acuosa usando agua fría como el mejor proceso de recuperación, se evaluaron ensayos mecánicos a 24 horas y a altas humedades ambientales, usando 1.0% de resina de caja fría y mezcla de arena recubierta con silicato y arena de proceso 75:25. Los resultados fueron muy similares a la muestra blanco o testigo (con 100% de arena de proceso). Lo mismo sucedió con los ensayos de distorsión y resistencia en caliente.

En el capítulo 5 se muestra la discusión de los resultados de la caracterización de los materiales; así como de los resultados obtenidos en la recuperación química, mecánica y acuosa; y de los ensayos mecánicos. Los análisis químicos elementales realizados por microscopía electrónica de barrido (*SEM*) de las muestras de arena recuperadas por lavado muestran que se disminuye la cantidad de sodio proveniente del silicato de sodio. Por tal motivo, los resultados de los ensayos mecánicos fueron exitosos, logrando recuperar la arena proveniente del proceso inorgánico para poder fabricar corazones de arena usando el proceso orgánico de caja fría. Al final, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de investigación.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las legislaciones ambientales en distintos países se han puesto más estrictas en controlar y disminuir las emisiones generadas por distintos ramos industriales, como la industria de la fundición, la cual genera gran cantidad de gases de invernadero que generan daños a los ecosistemas y en la salud de las personas y seres vivos [1].

Bajo este contexto, muchas fundiciones han estado trabajando con sistemas más sostenibles, capaces de disminuir o eliminar los contaminantes generados durante su proceso de fundición. Es por eso que muchas empresas de este ramo han ido cambiando su sistema para producir corazones usando aglutinantes inorgánicos base agua, en vez de los sistemas tradicionales orgánicos derivados del petróleo [2]. El volumen de ventas de sistemas de aglutinación base inorgánico han crecido fuertemente en los últimos 10 años [3].

A nivel mundial, las fundiciones europeas, principalmente alemanas, representaban hasta el 2018 un 85% en el uso de aglutinantes inorgánicos base silicato de sodio. En Asia, especialmente las fundiciones chinas, representaban solamente un 7%; en América un 6%; mientras que en el resto del mundo apenas un 2% trabaja con este tipo de sistema [4].

En el continente americano, el mercado mexicano por mucho es el mayor consumidor de sistemas de aglutinación inorgánica [4]. Esto es debido a que

México es el sexto productor mundial de vehículos ligeros [5] y muchos de sus clientes son compañías automotrices de origen alemán, las cuales demandan a sus proveedores usar tecnologías amigables al medio ambiente, como es el caso de estos materiales.

El sistema inorgánico, no obstante, presenta algunas desventajas frente a los típicos sistemas orgánicos derivados del petróleo [6]. En cuestión operativa, uno de los principales problemas de los corazones de arena fabricados con aglutinantes base silicato de sodio es su higroscopicidad. Estos corazones tienen que ser almacenados en condiciones secas o de bajas humedades relativas (menores a 40%) con el fin de no tener problemas de grietas o corazón roto durante el vaciado.

Otro problema derivado de la naturaleza química del aglutinante son los problemas de desarenado o remoción de los corazones después del vaciado. Ya que, contrario a las resinas orgánicas, estos aglutinantes base silicato no se queman al momento del vaciado del metal a altas temperaturas, es mucho más complicado el remover corazones de geometrías complejas y delgadas, por lo que se requieren aditivos especiales para poder llevar a cabo este tipo de proceso.

Para las fundiciones medianas y grandes, uno de sus principales problemas es la recuperación o reciclaje de las arenas que fueron recubiertas previamente con silicato de sodio para fabricar corazones. Normalmente las fundiciones pequeñas tienen que disponer o confinar las arenas residuales de sus procesos, sustituyendo esas pérdidas mediante la compra de arena nueva. Para las fundiciones más grandes, la compra de arena nueva para sustituir 100% su arena residual no es económicamente viable. Es por eso que el proceso de recuperación térmica de la arena es muy común en fundiciones grandes que usan corazones fabricados con resinas orgánicas.

Para aquellas fundiciones donde su proceso de fabricación de corazones es mayoritariamente inorgánico, la recuperación de la arena recubierta con silicato de sodio ha representado un gran reto, especialmente para aquellas fundiciones chinas y alemanas donde muchas plantas ya trabajan con un proceso de fabricación de corazones 100% inorgánico debido a las regulaciones ambientales que les exigen sus leyes.

En cuanto a las fundiciones mexicanas medianas y grandes, como ya se mencionó, muchas ya empiezan a trabajar con sistemas inorgánicos. Sin embargo, aun trabajan en su mayoría con sistemas orgánicos derivados del petróleo, por lo que trabajan con sistemas mixtos orgánico-inorgánico.

Los sistemas orgánicos para fabricar corazones de arena, como es el típico proceso de caja fría (llamado así por la amina usada para acelerar las reacciones entre las resinas, sin necesidad de usar calor para el proceso de curado) trabajan en ambientes de valores de pH neutros, por lo que la arena de sílice usada debe tener valores entre 7 y 9. La arena usada para el proceso inorgánico se vuelve alcalina (pH mayor a 10), debido a la alta alcalinidad del silicato de sodio), de modo que se debe evitar mezclar la arena nueva o recuperada térmicamente proveniente del proceso de caja fría con la arena proveniente del proceso inorgánico y que está recubierta con silicato de sodio.

Bajo este contexto, la importancia de tener un método capaz de eliminar o reducir el silicato de sodio presente en los granos de arena con el fin de reducir su valor de pH es cada día mayor. Todo esto con la finalidad de volver a usar esa arena proveniente del proceso inorgánico para fabricar corazones ya sea de procesos orgánicos como caja fría, o del mismo proceso inorgánico.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo de investigación es diseñar un método de recuperación de arena de sílice recubierta con silicato de sodio para producir corazones de arena de fundición mediante el proceso de caja fría.

Se plantea la hipótesis de que, ya sea el método de recuperación químico, mecánico o acuoso (lavado), eliminará o reducirá el silicato de sodio presente en la arena proveniente del proceso inorgánico, provocando una disminución en sus valores de pH y facilitando la fabricación de corazones del proceso orgánico de caja fría.

Referencias

1. Semarnat. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Informe del Medio Ambiente. México 2015. Disponible en: [apps.1semarnat.gob.mx:8443/dgeia7informe18/tema/cap5.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia7informe18/tema/cap5.html)
2. Banganayi F, Kasongo D. "Optimization of an environmentally friendly foundry inorganic binder core making process for the replacement of an inorganic binder" Metal Casting Technology Station, University of Johannesburg, South Africa. 1323-1330. 2020.
3. ASK Chemicals. Inorganic binder systems in iron casting – current state of the development and outlook. 2018.
4. Hüttenes-Albertus. Inorganic core binder technology: from Germany into the world. 2017.
5. Quest trend magazine. "The dramatic internationalization of the locations of worldwide automobile production". Italia, 2020.
6. Kumar R, Abhishek M. "Study on mechanical properties of bio based and inorganic binders for the preparation of core in metal casting". Department of Mechanical Engineering College, Mangalore, India. 2017.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ARENAS DE FUNDICIÓN

Uno de los elementos más abundantes en la tierra es la sílice en su forma de arena. Se presenta en abundancia en mares, dunas, desiertos, deltas, lagos y áreas de montañas erosionadas. La sílice es el material más abundante en la corteza terrestre, casi un 60 % se constituye por este compuesto [1].

La arena de sílice se ha seguido utilizando a lo largo de los años para la fabricación de moldes y arenas en la industria de la fundición debido a que presenta grandes bondades: es abundante, barata y no requiere un proceso muy complejo de tratamiento. Ésta representa una de las materias primas principales para la producción de piezas metálicas vaciadas.

2.1.1 Definición

Los geólogos clasifican los depósitos de arena de acuerdo a su agrupamiento en estratos, identificando la arena dentro de cada depósito por su origen y años. Una posible definición de arena, la cual puede ser aceptada tanto por geólogos como por ingenieros de fundición es que la arena es un material granular, natural o artificial, producido por la desintegración o trituración de las rocas.

La arena es un material inorgánico compuesto de granos de mineral suelto o agregados que varían de tamaño aproximadamente desde 0.06 a 2.1 mm de

diámetro [2]. Son partículas segregadas por la erosión del aire, del agua y del hielo, provenientes de las rocas existentes en montañas o ríos. Este término hace referencia al tamaño y no a la composición química del grano, por lo que se tiene que denotar la clase de mineral que es, ya sea sílice, circonia, cromita, olivina, etcétera.

2.1.2 Origen

Los depósitos de arena para fundición son el producto de cambios en la superficie de la tierra a través de los siglos por la acción del viento, el agua, el hielo y la nieve, como se observa en la figura 2.1. La composición de los depósitos depende de la naturaleza de los materiales que fueron erosionados y la manera en que fueron depositados. Los ríos que fluyen sobre la superficie de la Tierra pueden arrastrar una carga variable de minerales. Donde la corriente es rápida, es capaz de acarrear materiales tanto finos como gruesos, pero si la corriente es lenta, sólo puede transportar materiales finos. En esta forma, donde un río entra en un lago, la velocidad disminuye y las partículas más gruesas se depositan primero, a continuación se depositan las medianas, en tanto que las partículas finas son conducidas hasta aguas tranquilas. Por esta acción se clasifican los minerales cuando son depositados en arenas de banco y arenas de lago.



Figura 2.1 Depósito de arena de sílice en Wisconsin, EEUU [3].

- Arenas de banco. Estas son producto de la desintegración de la arenisca por la acción del tiempo. Estas arenas, esparcidas por el viento, cubren áreas extensas y se amontonan en forma de pequeños bancos. Las arenas de banco varían en pureza, dependiendo de los materiales extraños y minerales con que se han mezclado. En muchas áreas estas arenas tienen una alta pureza y son apropiadas para su uso en la fundición.
- Arenas de lago. Estas son de origen geológico reciente y están compuestas de arenas producidas por la erosión de rocas a lo largo de las orillas de los lagos, donde se han depositado para formar playas. Algunas arenas superficiales han sido desplazadas por el viento y en algunas áreas se las conoce como arenas de duna. Sin embargo, las dunas son parte todavía del depósito de arena de un lago.

2.1.3 Tipos de arena para fundición

Las principales arenas usadas en la fundición pueden clasificarse según su origen, que puede ser natural o sintético, al igual que por su forma de deposición [4].

Algunos requerimientos básicos de las arenas de fundición son:

- Tener estabilidad dimensional a altas temperaturas, dependiendo de la temperatura de fusión de la aleación a usar.
- Adecuada morfología. A mayor redondez, menor área superficial.
- Pureza. Los contaminantes como carbonatos modifican el pH de esta.
- Compatibilidad con los aglutinantes
- Inertes con el metal líquido
- Libre de volátiles
- Re-utilizables y económicamente disponibles

A) Sílice

La arena de sílice (SiO_2) está compuesta principalmente por granos de cuarzo, sin embargo, los granos están asociados con pequeñas cantidades de feldespatos, magnetita, circonia, mica, olivina y diferentes aluminosilicatos. Este es uno de los minerales más duros que se encuentran en la naturaleza y de mayor abundancia. Es altamente resistente al ataque de escorias, a la abrasión y también presenta características refractarias.

Las arenas de sílice se acumularon por el depósito de arena a lo largo de las costas de antiguos mares, donde estos depósitos fueron enterrados bajo una gruesa capa de sedimento posterior que se consolidaron para formar piedra arenisca. El levantamiento y desplazamiento de la superficie en algunas áreas ha expuesto capas de piedra arenisca que afloran y surgen a través de la superficie de la tierra. Además, en lugares donde ha existido una fuerte erosión de los materiales que cubre la piedra arenisca, la delgada capa de recarga que la cubre permite su extracción con facilidad.

La mayoría de las arenas de fundición se componen de este tipo de arena. Esto debido principalmente a las siguientes razones:

- Es la más abundante en la naturaleza.
- Fácil extracción de los depósitos minerales naturales.
- Se encuentran en gran variedad de distribuciones granulométricas.
- Resistencia al ataque químico.
- Refractarias y resistentes al calor (punto de fusión alrededor de los 1600°C).
- Bajo costo en relación con otras arenas.
- Gran compatibilidad con los aglutinantes orgánicos.

Sin embargo, la arena de sílice presenta la desventaja de sufrir cambios mineralógicos de fase produciendo expansiones en los moldes al momento del vaciado del metal [5].

La sílice tiene por lo menos 9 formas alotrópicas, entre las que están el cuarzo alfa, el cuarzo beta, la tridimita, la cristobalita, etc., hasta que esta se funde a 1713°C en un vidrio. Tiene una densidad real de 2.6 g/cm³.

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.

B) Circonia

Es un silicato natural $ZrSiO_4$ ó ZrO_2SiO_2 , con un contenido del 67% de circonio y de un 33% de sílice. Es normalmente obtenido de minas de Australia y en los Estados Unidos y además existen minas en Sudáfrica, Egipto y China.

Tiene una dureza de 7.5 en la escala de Mohs, una densidad de 4.7 g/cm³, una conductividad térmica superior al de la sílice y una muy baja expansión térmica. Su baja expansión térmica y su alta conductividad y densidad le proporcionan ventajas por encima a la sílice, sin embargo, su muy alta densidad y forma de grano le da muchas desventajas.

C) Cromita

Nombre mineralógico del compuesto $FeCr_2O_4$ el cual puede estar en combinación con otros óxidos de hierro, magnesio, manganeso y cinc, típicamente conteniendo un 68% de óxido de cromo. Muy común en minas de Sudáfrica, Rusia y Brasil.

Su dureza es de 5.5 en la escala de Mohs y su densidad de 4.55 g/cm³, de color negro, como se muestra en la figura 2.2. Sus ventajas ante la sílice es

que no presenta reacción química a alta temperatura y tiene una expansión térmica inferior. Su principal desventaja es el precio, por lo que solamente se utiliza para ciertos requerimientos especiales.

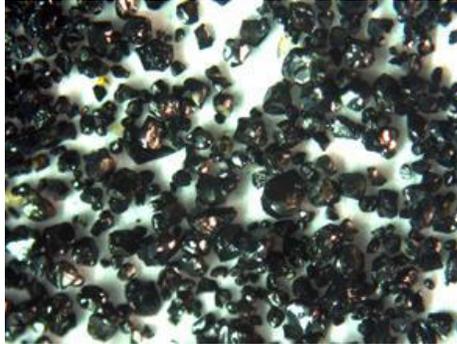


Figura 2.2 Granos de arena cromita.

D) Olivina

Es un ortosilicato de color verde, constituido por una solución sólida de Mg_2SiO_4 y Fe_2SiO_4 , sólo se puede obtener arena angular ya que esta arena es producto de la trituración del mineral. Es encontrada en Noruega con extensos depósitos, también en Japón, Suecia, Francia, y en los Estados Unidos.

Entre sus ventajas ante la sílice está su alta refractariedad, además de su bajo costo. Su principal desventaja es su alta fragilidad. La olivina tiene una densidad de 3.3 g/cm^3 .

E) Arenas sintéticas

La arena cerámica o arena sintética, es un desarrollo de los últimos tiempos en busca de mejorar propiedades de las actuales arenas utilizadas. Están formadas de partículas esféricas de mulita o de carburos y presentan una alta estabilidad térmica y baja expansión.

Uno de los inconvenientes que se ha observado con el uso de la arena sintética es el aumento en la cantidad de resina necesaria para la obtención de buenas resistencias mecánicas; esto se observa principalmente en granos de arena muy porosos lo cual hace que aumente su área superficial. Otro principal

inconveniente es su elevado precio debido al procesamiento de redondez que tienen que seguir este tipo de arenas [6].

2.1.4 Propiedades fisicoquímicas de las arenas

Las características de las arenas se consideran muy importantes debido a que esta comprende alrededor de un 99% de los moldes y corazones, por lo que va a tener gran influencia en las propiedades de éstos.

Las principales ventajas de usar arena de sílice 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.
- Es inerte a diversos agentes químicos
- Bajo costo en comparación a otras arenas.
- Se encuentra en diversas granulometrías, en granos redondos, sub-angulares, angulosos, compactos, cavernosos, agrietados y aglomerados de granos más pequeños.

Las principales propiedades fisicoquímicas que se consideran importantes en el análisis de las arenas en la industria de la fundición se describen a continuación:

a) Composición química

Las arenas de sílice se caracterizan por tener una alta pureza y un comportamiento neutro. Las arenas están compuestas casi en su totalidad de sílice, junto con esta se encuentran ciertos contaminantes que pueden ser benéficos al momento de vaciar. Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química típica de la arena de sílice [7].

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

b) Morfología

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 2.3) indica el grado de redondez y esfericidad de una partícula.

- *Angular*. Arena que presenta aristas y caras planas. Un grano anguloso tiene una mayor superficie y tiene menos permeabilidad.
- *Sub-angular*. Arena que presenta bordes redondeados, picos vértices y caras planas.
- *Redonda*. Arena de bordes redondeados y con apariencia esférica. Este tipo de arena tiene la menor superficie y tiene mayor permeabilidad.

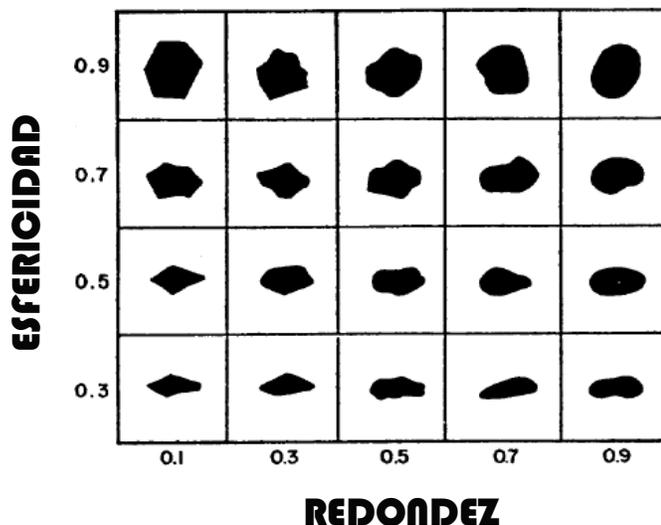


Figura 2.3 Diagrama de Krumbein [8].

c) Granulometría

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 μm , que son en su mayoría arcillas de diferente naturaleza, polvos muy finos de la misma arena y de material orgánico, raíces, humus, etc.

El número de AFS (*American Foundry Society* por sus siglas en inglés) es aproximadamente el número de aberturas por pulgada lineal de la malla o tamiz, que dejaría pasar solamente la muestra de arena. 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 [9].

La arena gruesa tiene un AFS menor a 45 y un contenido de finos menor al 3%, mientras que la arena fina tiene un AFS mayor a 55 y un contenido de finos mayor a 7%. Mientras mayor sea la finura de la arena, mayor será su área superficial, por lo que será necesaria una mayor cantidad de resina a usar, además que su permeabilidad disminuye.

d) Densidad

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

e) Temperatura y humedad

El rango de temperatura de uso de la arena oscila entre 20 y 30° C. Arena con temperatura mayor a 34°C, 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.

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 los recuperadores de arena, etcétera.

f) pH y demanda de ácido

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. Se mide directamente en mililitros de ácido requeridos para alcanzar un pH de 7. 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.

g) Pérdidas por ignición (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. Si este valor es elevado se producirán problemas de bajas propiedades mecánicas en los corazones.

h) Porcentaje de finos

Es un parámetro que indica la cantidad de granos muy pequeños (componente arcilloso) existentes en una cantidad de arena, el exceso de finos

tendrá ciertas consecuencias en la mezcla y la fabricación del corazón que generalmente son no deseados como adición extra de resina o catalizador, lo que conlleva a defectos en el corazón o en la pieza colada.

i) Expansión térmica

Una de las principales diferencias entre todas las arenas utilizadas para el propósito de fundición es la expansión térmica que presenta cada arena. La mayoría de las arenas de fundición está compuesta de cuarzo alfa. Estas se expanden a temperaturas de 573°C donde el cuarzo pasa a cuarzo beta, teniendo un 4.74% en cambio de volumen y una expansión lineal de 1.56%. Ver la figura 2.4.

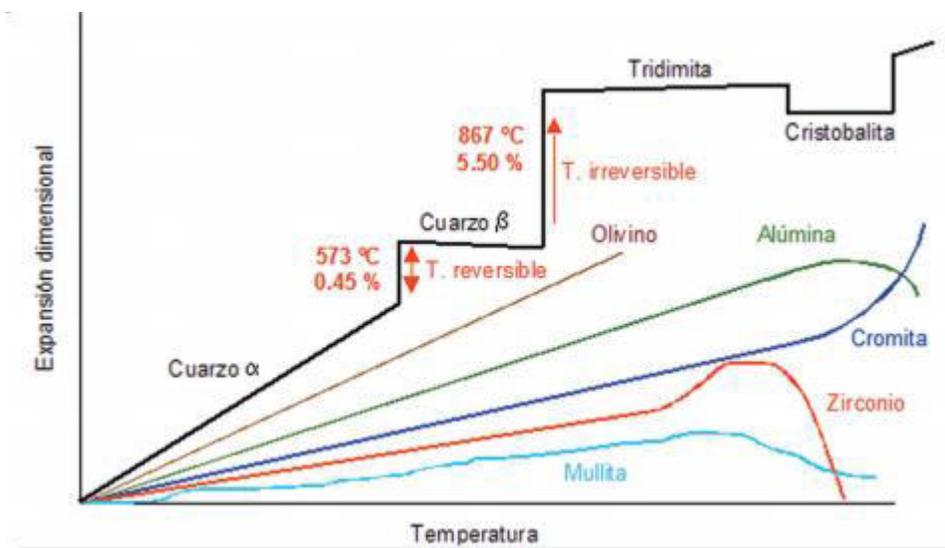


Figura 2.4 Expansión térmica de diferentes tipos de arena [10].

2.2 SISTEMAS DE AGLUTINACIÓN QUÍMICA

Los aglutinantes químicos son el segundo componente principal de los corazones y moldes, después de la arena, ya que éstos forman los puentes de unión entre grano y grano de arena. Normalmente los aglutinantes que

formarán los corazones son resinas orgánicas derivadas del petróleo, sin embargo, también las hay inorgánicas y orgánicas solubles en agua. Estos sistemas pueden o no ser catalizados por algún reactivo químico a temperatura ambiente, aunque también los hay que sólo se necesita de calor para poder formarse.

Antes de la Segunda Guerra Mundial, el proceso de moldeo con arena en verde predominaba en esa época. La producción de los corazones eran fabricados a partir de un proceso de curado en horno de arena aglomerada con aceite. A finales de la Segunda Guerra Mundial, se desarrollaron nuevos sistemas de aglutinación con resinas, especialmente después de 1950, como lo son los procesos Shell y el inorgánico con silicato de sodio y CO_2 . A partir de 1960 la mayoría de las fundiciones empezaron a usar polímeros para la aglutinación y formación de corazones de arena. A partir de ese momento y hasta ahora, los aglutinantes base orgánico derivados del petróleo siguen siendo los más utilizados en casi todas las fundiciones del mundo. Sin embargo, debido a las normas ambientales de algunos países, de los altos costos del petróleo y de diferentes especificaciones de los productos terminados, se han estado investigando nuevos tipos de sistemas de aglutinación química, en especial aquellos que no son derivados del petróleo. (Ver tabla 2.2).

Cada aglutinante o resina puede ser afectado por diferentes condiciones que parecerían no formar parte del proceso. Entre algunas de estas variables que pueden afectar la funcionalidad de los aglutinantes están: la arena, la segregación y el transporte de la arena, la temperatura, la humedad, la mezcla de la resina con contaminantes, etc.

Tabla 2.2 Historia de los procesos de aglutinación química [11].

Año	Proceso
1950	Moldeo con aceite
1950	Shell
1952	Silicato – CO ₂
1953	Aceites autofraguantes al aire
1958	Fenólico catalizador ácido no horneado
1958	Furánico con catalizador no horneado
1960	Furánico no horneado
1962	Fenólico caja caliente
1965	Uretánico no horneado
1967	Fenólico – CO ₂
1968	Fenólico – uretánico – amina
1968	Silicato – éster no horneado
1971	Furánico – SO ₂
1978	Caja tibia
1984	Acrílico – Epóxico – SO ₂
1985	Fenólico – éster caja fría
1990	Caja fría CO ₂ – resol
1992	Fosfato de alúmina
1995	UCB - biodiesel
1999	GMBOND
2000	Silicato caja caliente
2001	UCB – Tetraetilsilicato

2.2.1 Clasificación de los sistemas de aglutinación

Existen tres formas de clasificar los diferentes sistemas de aglutinación, las cuales son en base a: composición química, mecanismo catalizador y mecanismo físico de curado.

a) En base a su composición química:

Se pueden clasificar en orgánicos e inorgánicos. Los orgánicos pueden dividirse a su vez en compuestos no solubles en agua, como lo son los derivados del petróleo y en compuestos solubles en agua, como lo son los polisacáridos. Los compuestos inorgánicos pueden ser base fosfatos, silicatos, óxidos metálicos, etc.

b) En base a su mecanismo catalizador:

Esta clasificación se basa en el pH del catalizador, la tabla 2.3 muestra los sistemas de aglutinamiento tipo ácido ($\text{pH} < 7$) los cuales son curados mediante la adición de material alcalino y los sistemas de aglutinamiento básico ($\text{pH} > 7$) son curados mediante la adición de material ácido. Existen también otros sistemas de aglutinamiento químico curados por varios mecanismos que son independientes del valor de pH.

c) En base a su mecanismo físico de curado:

Esta clasificación se basa en la forma en la cual los moldes y corazones son físicamente curados, tabla 2.4. En el sistema de caja fría, el curado se lleva a cabo poniendo la mezcla en contacto con un catalizador vaporizado. Otro sistema es el de caja caliente, el cual consiste en poner en contacto la mezcla con una fuente de calor de curado. Finalmente el sistema no horneado el cual consiste en mezclar todos los componentes con un catalizador líquido que reacciona a temperatura ambiente.

Tabla 2.3 Sistemas de aglutinación química en base a su mecanismo catalizador [12].

Ácido	Básico	Otro
Ácido fenólico no horneado	Fenólico-éster no horneado	Silicato de sodio
Furánico-SO ₂	Fenólico-éster caja fría	Shell
Acrílico-epóxico-SO ₂	Fenólico-uretánico-amina	Moldeo en aceite
Silicato de sodio-CO ₂	Fosfato-alúmina	GMBOND
Fenólico-CO ₂	Aceite-uretánico no horneado	Silicato-éster

Tabla 2.4 Sistemas de aglutinación química en base a su mecanismo físico de curado [12].

Caja Fría	Caja Caliente	No horneado
Fenólico- Uretánico-amina	Furánico	Furánico-ácido
Furánico-SO ₂	Fenólico	Fenólico-acido
Acrílico-epóxico- SO ₂	Shell	Fenólico- uretánico
Silicato de sodio- CO ₂	Silicato de sodio	Fenólico-éster
Fenólico-CO ₂	GMBOND	Silicato-éster

2.3 PROCESO DE CAJA FRÍA

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.

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.

Algunas de las ventajas que presenta este proceso en comparación con los otros son:

- No requiere de calentamiento para el curado del corazón.
- Alta precisión dimensional
- Alta productividad.

- Excelente fluidez de la mezcla arena / resina.

Los sistemas de caja fría en la actualidad emplean diferentes aglutinantes y catalizadores, por ejemplo: trietilamina, dimetiletilamina, dimetilpropilamina, para aglutinantes fenólico uretánicos, dióxido de azufre para aglutinantes fenólicos y acrílicos epóxicos, dióxido de carbono para aglutinantes a partir de silicatos, etcétera.

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° C.

Los procesos de caja fría cumplen la secuencia típica de soplado, gaseado, purga y extracción del corazón, como se muestra en la figura 2.5. La arena es mezclada con resina, posteriormente es soplada dentro de la caja o herramental de corazones, después un gas catalizador se introduce a la caja y se hace pasar a través de la mezcla arena - resina, provocando el curado instantáneo de la misma.

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

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.

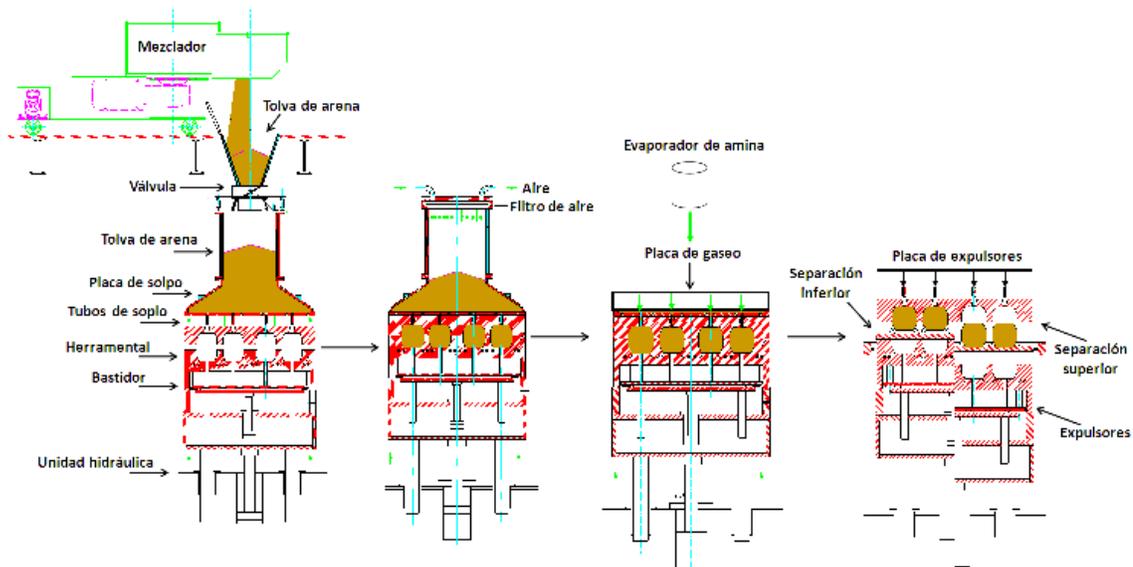


Figura 2.5 Proceso de soplado de corazones.

2.3.1 Sistema fenólico-uretánico.

El sistema de aglutinación fenólico-uretánico-amina fue introducido formalmente en la industria de la fundición en 1968. Este sistema consta de tres partes: la parte 1 (PI) que es una resina fenólica, la parte 2 (PII) que se compone del grupo isocianato y la tercera parte que es una amina terciaria líquida que se evapora durante el proceso como catalizador.

En cuanto a la cantidad de resina necesaria para formar corazones, ésta va a depender del tamaño y complejidad del corazón, los porcentajes en peso de la arena pueden variar desde un 0.6 hasta un 1.2%. La relación entre PI y PII generalmente es de un 50/50.

Como se mencionó, este sistema aglutinante se compone principalmente de tres partes:

a) Resina Fenólica (PI): La resina está compuesta de fenol formaldehído en un nivel de 45 a 60% en peso de la PI, al cambiar estas condiciones y cantidades de fenol y formaldehído, se obtienen resinas con propiedades muy diferentes. Estos componentes proporcionan la resistencia a la tensión tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas de un sistema fenólico uretánico. Los solventes conforman un 40 a un 60% en peso de la PI. El propósito primario de los solventes es reducir la viscosidad de la resina. Los aditivos cuando están presentes, pueden componer desde 1 a 5% en peso de la resina PI y son usados principalmente para mejorar la resistencia a la humedad del corazón y para facilitar la extracción del corazón del herramental

b) Isocianato (PII): Esta resina puede dividirse también en 3 componentes, el isocianato, solventes y aditivos. Los contenidos de isocianato pueden variar entre un 60 a 80% en peso dependiendo de las propiedades que se deseen. Los solventes comprenden desde 20 a 40% en peso y se usan para reducir la viscosidad de la resina PII. Los aditivos usados en la PII, se emplean para incrementar la resistencia a la humedad. Los aditivos pueden comprender desde 1 a 10% en peso.

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

Dentro de este proceso, 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 (ver Figura 2.6). Este poliuretano es el que une a los granos de arena y le da al proceso fenólico-uretánico sus características. El tamaño del puente de poliuretano que une los granos de arena dependerá directamente del contenido de resina que se utiliza para fabricar los corazones.

Además, la resina parte II puede también reaccionar con el grupo hidroxilo del agua, para formar un compuesto de poliurea que no es tan fuerte como el poliuretano. Esto hace que los corazones pierdan propiedades, en especial las mecánicas [12].

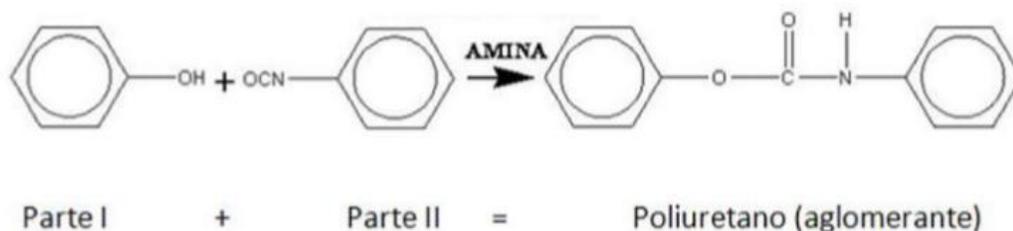


Figura 2.6 Reacción del proceso fenólico-uretánico Cold Box.

2.3.2 Poliuretanos

El poliuretano está en la clase de polímeros en los que se incluyen los epoxicos, los poliésteres insaturados y fenólicos. Una unión uretánica es producida por la reacción entre un grupo isocianato, $-N=C=O$ con un grupo hidroxilo, $-OH$. Los poliuretanos son producidos por la reacción de poliadición de un poliisocianato con un polialcohol o polioliol en la presencia de un catalizador y otros aditivos. El producto de reacción es un polímero conteniendo la unión uretánica, $-RNHCOOR'$. Los isocianatos reaccionarán con cualquier molécula que contenga un hidrógeno activo. Los isocianatos reaccionan con agua para formar una urea y dióxido de carbono. Comercialmente, los poliuretanos son producidos haciendo reaccionar un isocianato líquido con una mezcla líquida de poliols, catalizadores y otros aditivos [13].

El primer componente esencial de un polímero de poliuretano es el isocianato. Las moléculas que contienen dos grupos isocianatos son llamados diisocianatos. Los isocianatos pueden ser clasificados como aromáticos, tal como el difenilmetano diisocianato (MDI) o el tolueno diisocianato (TDI); o alifáticos, tal como el hexametileno diisocianato (HDI).

El segundo componente esencial es el polirol. Las moléculas que contienen dos grupos hidroxilos son llamadas dioles y aquellas con tres o más son llamadas polioles. En la práctica, los polioles son distinguidos por tener cadenas cortas o tener cadenas de glicoles de bajo peso molecular, además de entrecruzadores tales como el etilenglicol, 1,4-butanodiol, dietilenglicol y la glicerina. Las resinas fenólicas también forman parte para la creación del poliuretano, debido a sus grupos hidroxilos. La resina fenol-formaldehído es una resina sintética termoestable, obtenida como producto de la reacción de los fenoles con el formaldehído. Las resinas Novolac son resinas de fenol-formaldehído donde la proporción molar de formaldehído a fenol es menor a uno.

La reacción de polimerización es catalizada por aminas secundarias tal como la dimetilpropilamina. Los compuestos organometálicos como el octanato de bismuto también catalizan la reacción.

Los poliuretanos se clasifican en dos grupos, definidos por sus estructuras químicas y diferenciadas por su comportamiento frente a la temperatura. De esta manera pueden ser de dos tipos: termofijos o termoplásticos.

Los poliuretanos termofijos más habituales son espumas, muy utilizadas como aislantes térmicos y como espumas resilientes. Entre los poliuretanos termoplásticos más habituales destacan los empleados en elastómeros, adhesivos selladores de alto rendimiento, pinturas, fibras textiles, sellantes, embalajes, juntas, preservativos, componentes de automóvil, en la industria de la construcción, del mueble y múltiples aplicaciones más.

2.4 PROCESO DE CAJA CALIENTE

Como indica el nombre en este proceso se debe aplicar calor para que la resina reaccione y de forma al corazón. El proceso de caja caliente tiene una secuencia típica de soplado, curado y extracción. La temperatura de trabajo

para el proceso de caja caliente es de 180 a 280°C; esta temperatura depende de la formulación de la resina utilizada para fabricar los corazones.

Esta tecnología inició utilizando los sistemas furánicos, debido a que su reacción de polimerización es muy rápida en presencia de calor y esto fue una de las principales razones por la que se desarrollaron los furanos como un sistema de resina de caja caliente.

La reacción de curado de las resinas de caja caliente se realiza por acción de calor y de un catalizador. En la temperatura de operación de caja caliente, el catalizador forma un ácido fuerte que provoca que la resina se polimerice, es una reacción que forma agua como subproducto.

En la actualidad el proceso de caja caliente no solo utiliza resinas furánicas si no también resinas fenólicas y combinaciones de ambas (furánicas y fenólicas), además de otros nuevos sistemas de resinas orgánicas solubles en agua base polisacáridos o aminoácidos. También el proceso con aglutinante inorgánico implica este tipo de proceso. Todos estos aglutinantes utilizan el proceso de caja caliente para eliminar el agua presente en la mezcla arena-resina para formar el corazón.

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

2.4.1 Sistemas de resinas de caja caliente

La mayoría de los sistemas de resinas de caja caliente están clasificadas en tipo furánicas y fenólicas, las furánicas contienen alcohol furfurílico, las resinas fenólicas contienen fenol, ambos sistemas de resinas contienen urea y formaldehído además de otros aditivos.

Las formulaciones típicas para las resinas de caja caliente son:

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

La combinación de la temperatura de operación de caja así como el tipo de catalizador hace que la resina se polimerice de manera correcta para formar el corazón. Los principales catalizadores para los sistemas de resinas de caja caliente son soluciones acuosas de cloruro de amonio o nitrato de amonio.

La reacción en los sistemas de caja caliente se basan en una reacción de condensación, el agua formada es separada de una red tridimensional. La reacción es catalizada por un ácido cuya función es endurecer y esta reacción es promovida por el calor.

2.5 PROCESO SHELL

También conocido como proceso Croning [14], la arena de sílice 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, como se muestra en la Figura 2.7.

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.



Figura 2.7 Corazón procesado por Shell.

2.6 PROCESO DE CAJA CALIENTE CON SISTEMAS ORGÁNICOS SOLUBLES EN AGUA

Debido a las exigencias de las legislaciones ambientales en algunos países y además de los altos precios del petróleo, se han desarrollado en los últimos años sistemas de aglutinación orgánicos solubles en agua a base de biopolímeros. Compuestos no tóxicos, amigables al medio ambiente y económicos, son las características principales que deben tener estos sistemas aglutinantes. Las proteínas y los polisacáridos son algunos ejemplos de aglutinantes desarrollados en los últimos años. Una de sus principales características, aparte de las mencionadas anteriormente, es que éstos trabajan con el proceso de caja caliente debido a que tiene que ser necesario la eliminación del agua presente para poder formar los corazones.

2.6.1 Aglutinante base proteínas

Entre los sistemas de resina actualmente utilizados existe un sistema aglomerante para arena basado en proteínas solubles en agua derivadas de una fuente natural renovable. Este proceso fue desarrollado y patentado por General Motors en los años 90, buscaban una resina alternativa para formar moldes y corazones de arena, llamándola GMBOND® [15].

Esta resina es una gelatina, formada por la combinación de varios aminoácidos como glicina, alanina, ácido aspártico, ácido glutámico, entre otros, los cuales forman largas cadenas unidas por enlaces pépticos. Una importante cualidad de esta resina es que es soluble en agua, esto permite que el mecanismo de endurecido puede ser reversible si agua es agregada de nuevo a la proteína.

La arena primeramente se recubre con la resina GMBOND® a un rango entre 110 y 130°C, para después, con ayuda de algo de agua para activar la resina y usando aire caliente en la caja, se forman los corazones. Su principal desventaja son las propiedades mecánicas de los corazones y el olor característico cuando la resina se expone al calor.

2.6.2 Aglutinante base polisacáridos

Uno de los sistemas de aglutinación con mayor potencial son los de base polisacáridos, ya que estos presentan una amplia diversidad estructural y están presentes ampliamente en la naturaleza. Gran cantidad de polisacáridos son formados por biosíntesis de muchos organismos incluyendo plantas, animales, hongos, algas, etc., y están formados por carbohidratos.

Se considera como polisacárido aquel polímero constituido por más de 10 monosacáridos unidos por distintos enlaces glucosídicos. Se encuentran como cadenas lineales o ramificadas, que pueden estar integradas por un solo tipo de monosacáridos como el almidón y la celulosa, o también por varios tipos

de monosacáridos, como es el caso de la de las gomas. La mayoría de los aglutinantes usados en distintas fundiciones son base almidón (Figura 2.8).



Figura 2.8 Almidón de maíz

Las ventajas que presentan los polisacáridos es el fácil desarenado de las piezas, ya que los corazones con este tipo de resina se pueden desarenar fácilmente por la acción térmica o inclusive por el contacto con el agua.

2.7 PROCESO CON SISTEMAS INORGÁNICOS

Los aglutinantes orgánicos han sido continuamente desarrollados y optimizados durante años. Sin embargo, se requiere tomar 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. Debido a esto, se tiene que recurrir a costos adicionales. Para evitar reducir esos costos, los productores de aglutinantes orgánicos han estado llevando a cabo nuevos desarrollos de aglutinantes para mejorar estas cuestiones.

2.7.1 Generalidades y ventajas

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-CO₂®, caja caliente fenólica o de furano. Actualmente los aglutinantes base inorgánicos están teniendo de nuevo una mayor demanda [16].

El sistema de silicato-CO₂ es reconocido como el sistema original de caja fría, aunque nunca apareció de esa manera. Actualmente el uso de silicato sigue siendo el de mayor demanda como sistema inorgánico, aunque usando diferentes procesos y aditivos. Adicionalmente, el silicato de sodio es el componente principal de los aglutinantes inorgánicos debido a sus buenas propiedades y a sus bajos costos e impacto ambiental [17].

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

- El proceso es amigable al medio ambiente.
- Las materias primas son abundantes y económicas.
- Cualquier tipo de mezclador puede ser utilizado.
- Es completamente compatible con moldes de plástico y metales.
- Se puede trabajar ya sea como caja fría o como caja caliente.
- Buena estabilidad dimensional de los corazones.

Se han realizado modificaciones a estos sistemas aglutinantes para mejorar las características de acabado, introduciendo nuevas mezclas usando

resinas poliméricas y almidones para mejorar el desarenado, ciclos de gaseo o temperatura y resistencias.

Sin embargo, algunas de las desventajas que han presentado estos tipos de aglutinantes a través de los años y que algunas ya han logrado resolverse se enlistan a continuación:

- Bajas resistencias que presentan los corazones en condiciones extremas de humedad.
- Los corazones que presentan puentes o canales delgados tienden a agrietarse con facilidad, debido a su fragilidad.
- Mal desarenado.
- Arena pegada en las piezas metálicas, sobre todo en aquellas partes donde el desarenado fue malo.
- La no existente aun 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. En la figura 2.9 se observa como no se generan emisiones al vaciar el metal líquido en los moldes de arena con aglutinantes inorgánicos.



Figura 2.9 Formación de emisiones en el proceso de vaciado usando corazones orgánicos (izquierda) y corazones inorgánicos (derecha) [18].

2.7.2 Clasificación de los aglutinantes inorgánicos

Los sistemas de aglutinación inorgánica se pueden clasificar de acuerdo al compuesto químico principal que lo compone o al mecanismo físico de curado, que puede ser por caja fría o caja caliente.

En cuanto a la composición química de los principales aglutinantes inorgánicos están los silicatos, fosfatos, boratos y el sulfato de magnesio, siendo el silicato el más tradicional y en la actualidad el de mayor uso.

El mecanismo físico de curado puede ser en dos formas: por caja fría y por caja caliente. Por caja fría; componentes como el CO_2 y algunos ésteres en presencia de silicato y fosfatos ayudan al curado de los corazones. Por caja caliente, el proceso de deshidratación forma puentes entre los granos con suficiente resistencia mecánica para tener buenos corazones.

2.7.3 Silicatos y sus propiedades

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, además del silicato de potasio. Los silicatos de litio tienen también aplicaciones técnicas, pero son raramente usados debido a su costo.

Algunas de las aplicaciones principales de los silicatos de sodio en la industria son:

- Elaboración de detergentes líquidos.
- Blanqueador de pulpa en la industria papelera y en la textil.
- Aditivo en el tratamiento de aguas residuales.
- Como aglutinante en la industria de la construcción y fundición.

La fabricación de esas soluciones es generalmente hecha por la fusión de arena de sílice con carbonatos de sodio (Na_2CO_3) o de potasio (K_2CO_3) a 1200°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*" que es el silicato de sodio. Otro método menos frecuente es la disolución de arena de sílice en una solución alcalina (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.

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. 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 trómeros lineales o cíclicos, así como también estructuras tridimensionales.

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. 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. La selección de la relación del silicato dependerá del tipo de material a aglomerar, tipo de mecanismo de aglutinación y tiempo necesario. Esta relación es uno de los factores más determinantes del desempeño del silicato en cuanto a su resistencia mecánica [19].

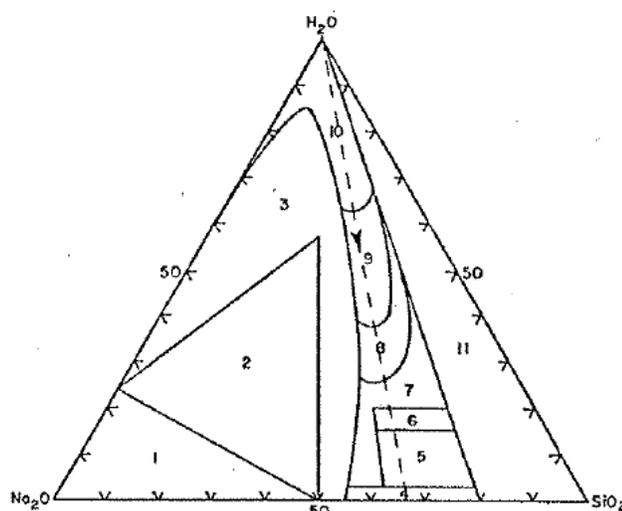


Figura 2.10 Diagrama ternario a temperatura ambiente mostrando cambios de fase del silicato de sodio dependiendo del contenido de agua: 1) Orto silicato de sodio anhidro, 2) silicatos alcalinos cristalinos, 3) mezclas cristalizadas, 4) vidrios 5) vidrios hidratados, 6) líquidos deshidratados, 7) semisólidos no económicos, 8) líquidos viscosos no económicos, 9) líquidos comerciales, 10) líquidos diluidos, 11) líquidos y geles inestables [19].

En lo que respecta a las propiedades físicas y químicas, estas también juegan un papel importante, ya que dependen directamente de la relación $\text{SiO}_2:\text{M}_2\text{O}$. Entre estas propiedades se encuentran:

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.

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 [20].

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_2 . Algunos 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^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} , 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. Es sabido que las superficies de cemento Portland son endurecidas y se hacen menos porosas cuando se aplica una solución de silicato a pisos o paredes.

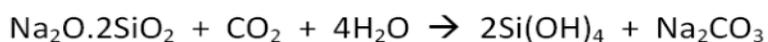
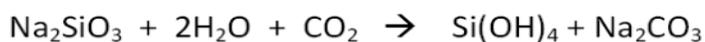
4. Interacción con compuestos orgánicos: Relativamente pocos compuestos orgánicos son compatibles con soluciones de silicato soluble concentrado. Solventes polares pueden causar una separación de fase o deshidratación. Para compuestos como la glicerina, sorbitol de azúcar y etilenglicol son miscibles 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.

2.7.4 Procesos base silicato

Proceso silicato – CO₂

El proceso de silicato curado con CO₂ 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 / CO₂ dieron pie a usar cada vez más este proceso aparte de otros procesos de caja fría. Primero, es basado en compuestos inorgánicos. Segundo, debido a que el CO₂ es un gas no irritante, no tiene que ser capturado y neutralizado.

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 Na₂CO₃, el principal ingrediente para fabricar el silicato de sodio.



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.

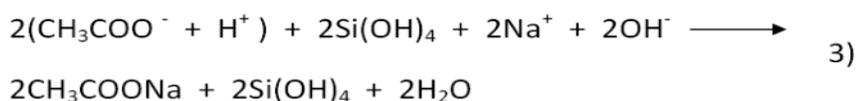
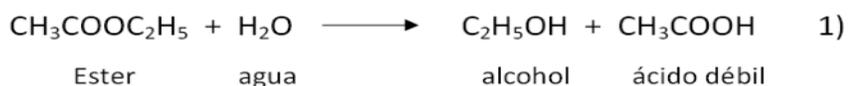
Algunas características del proceso son:

- La reacción química es irreversible.

- Bajas resistencias obtenidas.
- El agua (disolvente) se queda en el corazón.
- A elevadas temperaturas el Na_2CO_3 y el 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.

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. Por la saponificación 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.



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-CO₂.

Proceso de caja caliente con silicato

El proceso de deshidratación (figura 2.11) 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.

Características del proceso:

- El proceso 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.
- El aire caliente o vapor ayuda a la distribución de calor y un mejor curado en corazones masivos.

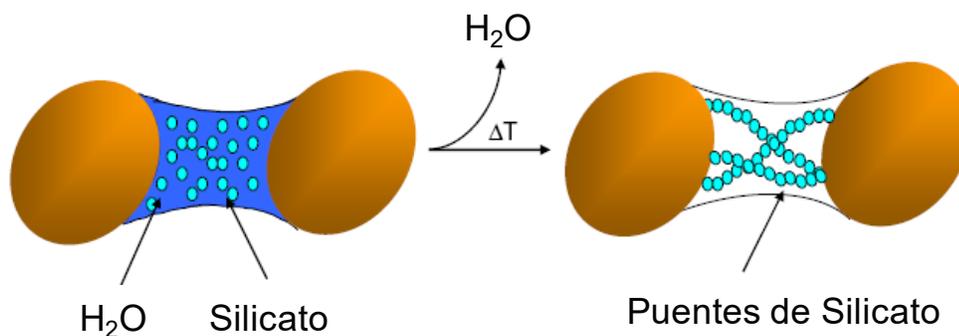


Figura 2.11 Esquema del proceso de deshidratación del aglutinante base silicato [21].

2.7.5 Avances recientes en la tecnología de arena con silicato de sodio

En la zona del diagrama de fases donde el silicato de sodio tiene aplicación comercial, este se disuelve en agua, existiendo tanto en estado de solución como en estado coloidal. Cuando el módulo de $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ es menor a 2, solamente se obtienen silicatos cristalinos; cuando el módulo es mayor a 4, todos los silicatos son micelas coloidales en forma de geles y pierden su viscosidad. Así, el módulo del silicato de sodio debe ser mayor a 2 y menor a 4, y su concentración debe ser más grande a 35% y menor que 42% [22].

Modificación del silicato de sodio

Modificación física

El silicato de sodio envejecido llega a ser una mezcla de orto-silicato y partículas coloidales, por lo que se reduce su capacidad de aglutinamiento en un 20-30% en un mes. El envejecimiento del silicato puede ser eliminado con un campo magnético fuerte, vibración ultrasónica, corriente eléctrica, ebullición bajo reflujo, etc., esto para poder proveer energía al sistema y re-homogeneizar el grado de polimerización de los silicatos.

Modificación química

Algunos aditivos químicos pueden ser añadidos al silicato de sodio para cambiar su estructura estérica y así incrementar su resistencia de enlace entre un 30 y 50%. Los métodos de modificación química se alistan a continuación:

a) Modificación catiónica

- La adición de K^+ hace al silicato más estable para su envejecimiento y evaporación de agua. La resistencia del enlace aumenta de un 5 a 10% y se aumenta la colapsabilidad del corazón [22]. La habilidad de absorción de agua, sin embargo, llega a ser más grande con la adición de potasio. Se menciona que una adición de 60% de silicato de sodio y un 40% de

silicato de potasio pueden aumentar hasta un 110% más la resistencia que usando solamente silicato de sodio.

- El silicato de litio es insoluble en agua, esto debido a que el Li^+ es demasiado pequeño para formar un sistema de coordinación estable entre el ión dentro del anillo hexagonal Si-O. Este silicato no puede ser preparado disolviendo harina de cuarzo en una solución caliente de LiOH o fundiendo cuarzo con carbonato de litio. Sin embargo, se puede preparar mezclando un sol de sílice o polvo de gel de sílice fino con la solución de LiOH . Al principio se obtiene una suspensión lechosa, que manteniéndola por varios días se obtiene un líquido transparente conocido como silicato de litio, que en realidad es un sol coloidal de partículas muy finas estabilizado por iones Li^+ .
- El silicato de tetraetil amonio se prepara disolviendo SiO_2 amorfo en una solución de hidróxido de tetraetil amonio, sin embargo, este es muy caro. El amonio cuaternario puede ser descompuesto muy fácilmente por calor, por lo que la adición de éste al silicato ayuda a mejorar el desarenado.

b) Modificación aniónica

- Si una pequeña cantidad de borato BO_3^{3+} , aluminatos AlO_3^{3+} , fosfatos PO_3^{3+} y titanato TiO_4^{4+} son añadidos al silicato calentando y agitando vigorosamente, los aniones se insertaran a la cadena $-\text{Si-O-Si}-$. Usualmente este tratamiento incrementa la resistencia mecánica hasta un 30% [22].

c) Modificación orgánica

- La modificación orgánica tiene un amplio sentido, por ejemplo, algunos polvos orgánicos o líquidos son agregados al silicato para mejorar la colapsabilidad de los moldes y corazones. Algunos polioles tales como el

xilitol, sorbitol, pentaeritritol, fructosa y maltosa hidrogenada son añadidos, mejorando resistencia mecánica y el desarenado.

d) Modificación polimérica

- Algunos polímeros solubles en agua tales como la poliacrilamida, polimetil acrilamida, ácido poliacrílico, copolímero de estireno-ácido maléico, etc., pueden ser añadidos al silicato para mejorar resistencia.

Últimos avances del silicato de sodio

Silicato de sodio sin sales

El silicato de sodio sin sales significa que no hay presencia de sales como aditivo, tales como KCl, NaCl, Na₂SO₄, Na₂CO₃, que son mezclados al silicato. Estos aditivos provienen de impurezas de las materias primas, tales como la sosa cáustica, carbonato de sodio, cuarzo y agua. Estas sales son perjudiciales para las propiedades del silicato. La viscosidad incrementa exponencialmente con la concentración de la sal [22].

Si las sales de los aditivos mezclados en el silicato hidrolizan a cationes metálicos y aniones acídicos, entonces el número de cationes difusos en la capa difusa de la micela del silicato coloidal se incrementa. Parte del Na⁺ es empujado de regreso a la capa absorbida y la carga de electrón de la capa difusa a la capa absorbida es además disminuida. El valor diferente de la carga del electrón es conocido como potencial zeta [23], observado en la figura 2.12. Como resultado de esto, la capa difusa llega a ser más delgada, el potencial zeta llega a ser más pequeño y las micelas coloidales son fáciles de aglomerar. En otras palabras, el silicato de sodio tiende a polimerizar a un grado más alto, por lo que se incrementa la viscosidad significativamente. Cuando este tipo de silicato sin sales es usado para reemplazar el convencional, la adición de silicato se puede reducir hasta un 20%. Sin embargo, el silicato sin sales se seca fácilmente y se endurece debido a la evaporación del agua.

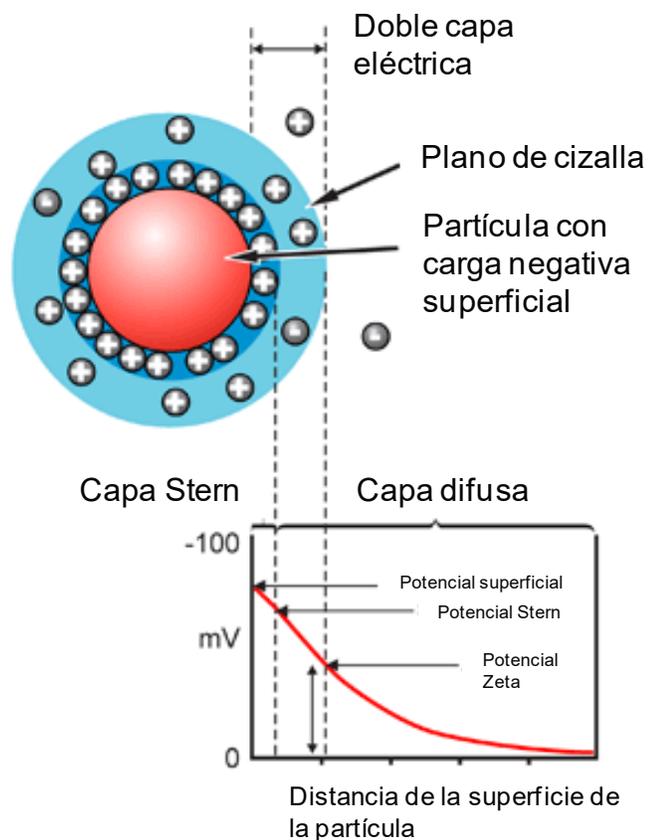


Figura 2.12 Modelo de la doble capa eléctrica y potencial zeta [23].

Nanomodificación

La nano-sílice hidrofílica ha sido obtenida satisfactoriamente por la adición de alcohol semi-miscible en un sistema hidrolizado de tetraetil ortosilicato. Además, el aluminosilicato en polvo a nanoescala ayuda a mejorar el desarenado y la recuperación de la arena con silicato [22].

2.7.6 Aglutinantes base fosfatos y sus procesos

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 [24].

El endurecimiento del aglutinante base fosfato puede llevarse a cabo ya sea por endurecimiento químico o por gaseo con CO₂ y además por medio de temperatura.

2.7.7 Aditivos usados en sistemas inorgánicos

Muchos materiales han sido encontrados para ser compatibles con el silicato de sodio e inclusive los fosfatos. Éstos han sido mezclados en diferentes porcentajes para modificar la acción del aglutinante inorgánico para diferentes propósitos, especialmente mejorar el desarenado y la arena pegada en las piezas.

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 [25].

2.8 TENDENCIAS EN EL DESARROLLO DE AGLUTINANTES PARA CORAZONES Y MOLDES DE ARENA

Hay muchos criterios y muchas divisiones para los aglutinantes usados en moldes y corazones. Dobosz y colaboradores [26] las clasifican en cuatro generaciones:

Generación I: la arcilla es el material aglutinante.

Generación II: un adhesivo funciona como el aglutinante.

Generación III: arenas enlazadas por factores físicos.

Generación IV: arenas enlazadas por factores biotecnológicos.

Las resinas sintéticas usadas como aglutinantes van a ser más limitadas en el futuro, mientras que las sustancias inorgánicas, incluyendo base silicatos, incrementarán en uso. Además otras soluciones interesantes para usarse como aglutinantes podrían ser los geopolímeros, los biopolímeros, los fosfatos y las sales.

1. Geopolímeros

Además del uso del silicato de sodio como aglutinante inorgánico, otra alternativa es el uso de geopolímeros. Los geopolímeros pertenecen a los aluminosilicatos alcalinos. En la naturaleza existen materiales similares, tales como las zeolitas. En 1979 se introdujo el término de “Geopolímero” para denotar a aquellos polímeros de origen inorgánico obtenidos tras la síntesis de una solución alcalina con un sólido constituido por aluminosilicatos, surgiendo así el término de geopolymerización.

En general, los geopolímeros están constituidos por una red de silicatos compuestos por tetraedros de SiO_4 y AlO_4 enlazados alternativamente con átomos de oxígeno, como se observa en la figura 2.13. Los geopolímeros pueden ser sintetizados por medio de reacciones de policondensación de óxidos de aluminosilicatos, tales como arcillas calcinadas, minerales naturales, desechos industriales, rocas volcánicas o mezclas de dos o más materiales. Estos minerales o subproductos industriales son combinados con un activador alcalino a bajas temperaturas (menores a 200°C) para generar enlaces poliméricos Si-Al-O (figura 2.13).

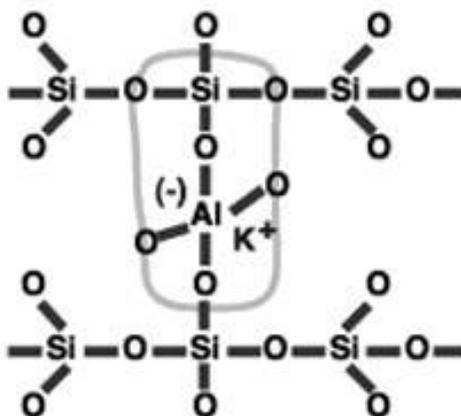


Figura 2.13 Red de un aluminosilicato.

Los geopolímeros tienen un elevado potencial para ser usados en numerosos campos, pero predomina el uso como sustitutos de cemento portland, campo al que se ha dirigido la mayor parte de la investigación. Estos materiales pueden también ser interesantes para la industria de la fundición. En Francia apareció por primera vez un aglutinante basado en geopolímeros, diseñado para aplicaciones especiales. Otra solución fue desarrollada por Skvara y colaboradores en la República Checa, un sistema de aglutinante inorgánico proveniente de geopolímeros, partiendo de la activación de ceniza volante y diseñada para la fabricación de moldes, corazones, morteros y otros productos cerámicos [27].

2. Fosfatos

Las arenas para moldeo con aglutinantes base fosfatos son recientemente un tema de investigación científica. Los componentes básicos de aglutinación son los fosfatos, más comúnmente los fosfatos de aluminio líquidos. El segundo componente juega el papel de endurecedor, el cual es un óxido de metal en polvo, tales como CuO, FeO, MgO, Fe₂O₃, o NiO. Los fosfatos son las sales del ácido fosfórico (H₃PO₄), conteniendo fósforo pentavalente. Algunos fosfatos presentan

la habilidad de polimerizar. Estos polifosfatos son principalmente los meta-fosfatos, los orto-fosfatos y los difosfatos de hidrógeno.

Este tipo de aglutinantes supera la pobre colapsabilidad de los aglutinantes base silicato de sodio, además que tienen una alta habilidad de recuperación de la arena y por supuesto que es inofensivo al medio ambiente. Los corazones o moldes de arena hechos con aglutinante base fosfatos presentan el mismo desarenado o colapsabilidad que aquellos que están fabricados con resinas orgánicas. Mala estabilidad del aglutinante y una alta higroscopia, aparte de problemas del proceso de mezclado han llegado a ser parámetros ya controlados.

3. Biopolímeros

Los aglutinantes orgánicos basados en resinas sintéticas se caracterizan por tener buenas propiedades mecánicas y un buen desarenado, sin embargo también generan importantes emisiones peligrosas a la atmósfera. Es por eso que las actuales investigaciones van dirigidas gradualmente a reemplazar los aglutinantes provenientes del petróleo, mediante el uso de biocompuestos provenientes de fuentes renovables.

Hay dos tipos principales de biopolímeros: los naturales, que se presentan en organismos vivos y son producidos por ellos, tal es el caso de las proteínas y los polisacáridos; y los artificiales, que resultan de la polimerización de sustancias provenientes de recursos renovables, tales como los poliésteres alifáticos. Estos polímeros artificiales también son conocidos como compuestos macromoleculares.

En los 90's, General Motors Co. elaboró un nuevo sistema de aglutinación basado en una composición de proteínas llamándolo GMBOND® [15]. Compuesto por cadenas de polipéptidos (figura 2.14), éste aglutinante es soluble en agua y el proceso de curado comienza cuando ocurre la reacción de deshidratación. El proceso de recubrimiento de la arena con la resina GMBOND® se inicia con el calentamiento de la arena, la cual debe de estar en

un rango de temperatura de 110 a 130°C, posteriormente la arena es colocada en un molino y se inicia el mezclado en seco, con el mezclador en movimiento se agrega la resina GMBOND®, el porcentaje puede variar de 0.75 a 1.5% con respecto al peso de la arena y depende del tipo de corazón que se requiera fabricar. Nuevamente con el mezclador en movimiento se agrega 3% agua y se continua el mezclado. Por último la arena recubierta es enfriada y almacenada para su posterior uso en la fabricación de moldes y corazones de arena.

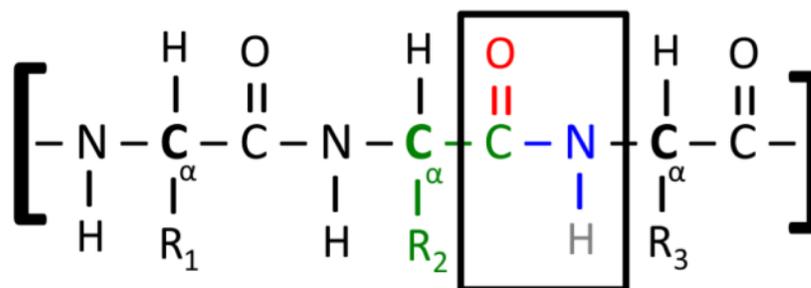


Figura 2.14 Ejemplo de un enlace peptídico.

Los polisacáridos son los únicos biopolímeros con una amplia diversidad estructural. Gran cantidad de polisacáridos son formados por biosíntesis de muchos organismos incluyendo plantas, animales, hongos, algas. Están formados por azúcares, cuyo nombre químico es carbohidratos. El almidón, al igual que otros tipos de carbohidratos ha sido utilizado principalmente para el desarrollo de aglutinantes orgánicos solubles en agua. Debido a su estructura molecular (figura 2.15), estos aglutinantes no desarrollan suficiente resistencia mecánica en los corazones, a pesar de sus altas propiedades de desarenado y recuperación. Una opción es modificar por métodos físicos o químicos su estructura química para mejorar sus propiedades de aglutinación, como lo es con el almidón- α . La producción de corazones y moldes de arena en empresas de fundición mediante el uso de estos aglutinantes base almidón juegan un papel importante en países poco desarrollados y donde la agricultura y la

producción de almidón es importante, tal es el caso de países de África Central como Nigeria, donde se ha estado estudiando el desarrollo de este sistema [28].

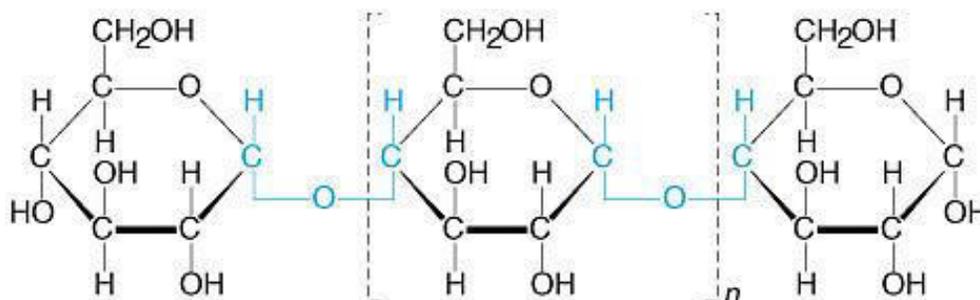


Figura 2.15 Estructura de una molécula de almidón

Otros materiales de tipo biopolímeros son los compuestos macromoleculares o biopolímeros artificiales. Muchos de estos productos son poliésteres alifáticos derivados de la fermentación de fuentes renovables como el almidón o la caña de azúcar. Compuestos como láctidos, glicoles, caprolactonas, acetil-CoA y la celulosa forman su subsecuente poli-láctido, poli-ácidoláctico-co-glicólico, poli-caprolactonas, poli-hidroxibuterato y acetato de celulosa mediante biosíntesis microbianas, fermentaciones o síntesis química. La mayoría del uso de estos polímeros como aglutinante de arena de sílice es mediante el uso de calor para favorecer la deshidratación y formar el enlace [29].

4. Sales

Los aglutinantes basados en sales inorgánicas se usan especialmente para fabricar componentes complejos de fundición [30]. La velocidad de curado de los corazones resulta de la velocidad de deshidratación de la arena de moldeo. Es por eso que los equipos necesarios para la producción de corazones de sal deben calentar la arena alrededor de los 80°C, mientras que el ciclo de producción depende en su volumen y que está entre 10 y 80 s.

Las sales inorgánicas, expuestas bajo altas presiones, fueron usadas por mucho tiempo en las fundiciones en general, especialmente aquellas aleaciones de Al que necesitan pasar por el proceso de “*high pressure die casting*”. Diferentes sales como KCl, NaCl, Na₂CO₃, y K₂CO₃ y composiciones de esas sales con otros granos como ZrSiO₄, SiO₂ y Al₂O₃ han sido aplicadas en este método de altas presiones y siguen siendo objeto de estudio para incrementar la resistencia de los corazones a temperatura ambiente y a altas temperaturas (figura 2.16).



Figura 2.16 Ejemplo de corazones de sal [30].

2.9 FUNDAMENTOS DE CORAZONES Y MOLDES DE FUNDICIÓN

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 [31]. Generalmente los corazones de fundición son fabricados casi en su totalidad de arena de sílice usando alguna resina orgánica que se encarga de endurecerlos. El corazón representa todas las cavidades internas que debe tener la pieza de metal, por lo que debe destruirse para retirarlo, razón por la que es utilizada arena para fabricarlos, como se ve en la figura 2.17.

Dependiendo del tipo de arena utilizada las propiedades del corazón pueden ser muy diferentes.

Las propiedades principales que se deben de tener para obtener buenos corazones son:

- resistir la presión que el metal ejerce en el momento del vaciado,
- permitir la salida de los gases de combustión y pirólisis del propio corazón en el momento del vaciado,
- permitir la contracción del metal en el momento de la solidificación durante el enfriamiento de la pieza
- mantener la precisión en las dimensiones de la pieza vaciada.

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 provoque defectos en las piezas.



Figura 2.17 Corazones de arena de sílice obtenidos por el proceso de caja fría.

2.9.1 Propiedades de los corazones y mezclas de arena-resina

Para obtener piezas de buena calidad, los corazones deben cumplir con las especificaciones de moldeo y vaciado: tener buena resistencia mecánica para ser manejables, ser permeables, refractarios, colapsarse con facilidad al momento de removerlos de la pieza, tener una superficie lisa, entre otras [32].

- 1) **Resistencia mecánica:** Ayuda a determinar si un corazón tiene primeramente la resistencia suficiente como para ser manejados al momento en que se producen y ya una vez almacenados; además de la resistencia necesaria para soportar la presión ejercida por el metal líquido en el momento del vaciado. A nivel laboratorio se mide resistencia a la flexión o a la tensión de probetas.
- 2) **Resistencia y distorsión en caliente:** Determinan la deformación del corazón a temperaturas de vaciado del metal. Esta prueba es de suma importancia ya que el corazón no debe de colapsar o fracturarse con el metal líquido a altas temperaturas, al igual que ver el grado máximo de deformación que presenta.
- 3) **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.
- 4) **Vida de banco de la mezcla arena-resina:** Es el periodo de tiempo durante el cual una mezcla de arena-resina mantiene sus propiedades antes de ser usada para fabricar los corazones.
- 5) **Permeabilidad:** Capacidad o habilidad del molde o corazón para dejar salir el aire o los gases a través de estos que se generan al momento de estar en contacto con el metal fundido. Mientras más alto sea el número de centímetros cúbicos de gases, se dice que es más permeable la arena. Este parámetro permite saber el grado de compactación de los granos de arena y 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 gas colapsado.

- 6) **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 provocando cavidades huecas debido al gas atrapado.
- 7) **Colapsabilidad / Desarenado:** Habilidad de la arena aglutinada de disgregarse después de que el molde ha sido vaciado, es la habilidad que presenta para el desmoldeo.
- 8) **Fluidez de la mezcla arena-resina:** Está relacionada con la compactibilidad, ya que se define como la capacidad de la arena para "fluir" y llenar la cavidad del molde bajo la acción de la fuerza de compactación. El conocer el valor de fluidez da un indicio de la aptitud de la arena para el moldeo.

2.10 RECUPERACIÓN DE LA ARENA

Se estima que cada año, las fundiciones de Estados Unidos generan entre 9 y 13 millones de toneladas de arena que no es apta para su uso continuo en el proceso de fabricación de moldes y corazones. De toda esta arena, solo un pequeño porcentaje se clasifica como residuo no peligroso [33].

La arena después de ser utilizada en el proceso de fundición se contamina con finos, cenizas, resina calcinada, rebaba metálica o simplemente se mezclan la arena de los moldes y la de los corazones. Un aspecto de relevancia es el hecho de que la presencia de dichas impurezas reduce la temperatura de sinterización y esto a su vez produce un mayor deterioro en los granos de arena con lo cual la vida útil decrece. Debido a esto, es necesario el uso

de arena nueva cada vez que se van a fabricar moldes o corazones. Además de esto, los costos de disponer la arena siempre aumentan, por lo que muchas fundiciones están recuperando su arena para su reutilización [34].

No obstante, el aumento del costo de arena nueva, aunado a la transportación de ésta desde la mina a la fábrica y en conjunto con las exigencias ambientales, ha traído como consecuencia que las industrias de fundición sometan a la arena a un proceso de recuperación para darle nuevamente un uso.

La recuperación de arenas es el tratamiento físico, térmico o químico para permitir su re-uso sin tener pérdidas significativas en cuanto a sus propiedades originales.

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.

Entre algunos factores que afectan la recuperación están el contenido y tipo de sistema del aglutinante utilizado, acabado de la pieza metálica, tipo de arena, etcétera.

2.10.1 Beneficios de la recuperación

Como ya se ha mencionado, existen beneficios para las fundiciones que actualmente recuperan su arena que usan para fabricar corazones o moldes. Algunos de ellos son:

- Eliminación de hasta un 95% en la compra de arena nueva: si una fundición deseara recuperar toda su arena de proceso, se reduciría la compra de arena hasta un 95%, ya que se re-utilizaría ese porcentaje

de arena; mientras que el 5% restante, que se va en finos, tendría que compensarse en el sistema comprando arena nueva.

- Eliminación de costos de confinamiento: la arena que no es recuperada, se tiene que disponer en celdas de confinamiento ya que se clasifica como un residuo peligroso debido al contenido de resinas orgánicas que hay presentes. Esto involucra un costo de confinamiento de la arena.
- Reducción del impacto ambiental: reciclar las arenas de fundición ayuda a minimizar el impacto ambiental ocasionado por la extracción de éstas. Algunos de los impactos ambientales causados por la extracción de arena sílice son [35]:
 - modificación del suelo
 - modificación del paisaje
 - daño o eliminación de la vegetación
 - contaminación del aire y suelo.

2.10.2 Tipos de recuperación

En la actualidad, existen diferentes métodos para poder recuperar arenas de fundición, dependiendo del tipo de aglutinante usado y de la calidad de la arena. Estos sistemas para limpieza de la arena se dividen en:

1. Recuperación térmica
2. Recuperación en seco
 - a) Mecánica
 - b) Neumática

3. Recuperación húmeda / acuosa
4. Recuperación química
5. Recuperación biológica
6. Recuperaciones mixtas y no convencionales

Recuperación térmica

La calcinación a ciertas temperaturas de las arenas que contienen resinas orgánicas permite la eliminación parcial o total de los contenidos orgánicos, recuperando de una manera casi efectiva la arena. El objetivo de la recuperación térmica es eliminar la resina residual de la arena para ser reutilizada en la fabricación de corazones.

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. Es por eso que este tipo de recuperación es el más adecuado para los procesos orgánicos. El equipo utilizado para la calcinación puede ser de tres tipos: horno rotatorio, horno múltiple y lecho fluidizado, como se observa en la figura 2.18.

La unidad de recuperación térmica consiste en una quebradora para la trituración de los terrones y un equipo de cribado para la separación de la materia metálica. La velocidad de calentamiento debe ser controlada con el fin de evitar indebidamente la ruptura de los granos. La cámara en donde se realiza el tratamiento es generalmente un lecho fluidizado en el cual la abrasión dada entre los granos ofrece una ayuda para el tratamiento.

La desventaja clara del proceso es la necesidad de energía térmica o combustible, en donde se requiere aproximadamente un millón de BTU por tonelada [36].

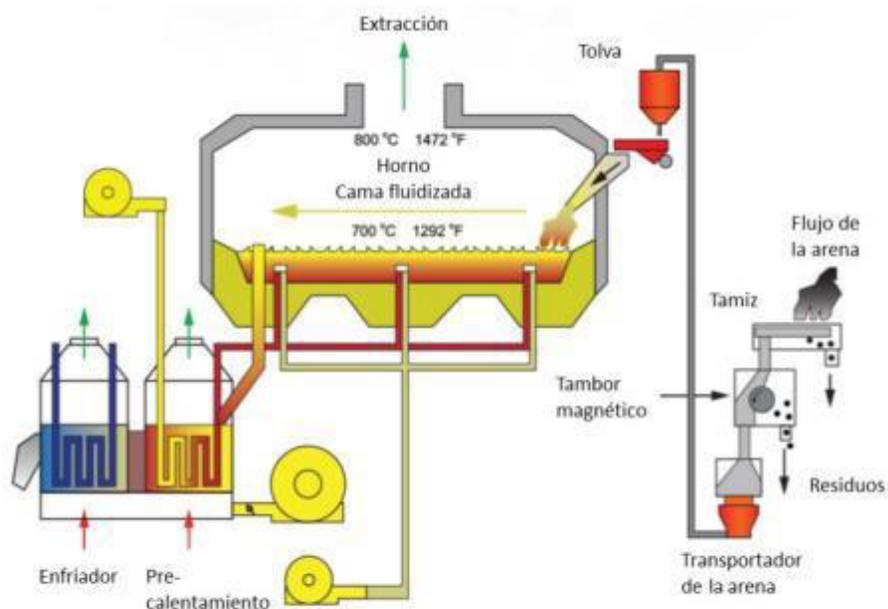


Figura 2.18 Equipo de recuperación térmica [37]

Recuperación mecánica

Este método se basa en la remoción de las capas de resina presentes en los granos de arena por medio de la fricción entre éstos.

Los equipos atricionan la arena mediante el proceso de abrasión y la presión que ejercen los rodillos contra la arena y el tambor que es controlada por el regulador de presión de aire, donde se minimiza el desgaste de las partes metálicas con refuerzos cerámicos en la superficie de los rodillos. Subsecuentemente las etapas de remoción del polvo, finos y la clasificación, darán como consecuencia un bajo valor en las pérdidas por ignición (LOI) de la arena. Los finos se separan usando mallas e hidrociclones.

La atrición mecánica puede ser llevada a temperatura ambiente, a altas temperaturas [38] y a temperaturas criogénicas, todo esto para aumentar la

eliminación de la capa de resina sobre los granos de arena. El proceso de atrición se puede observar en la figura 2.19.

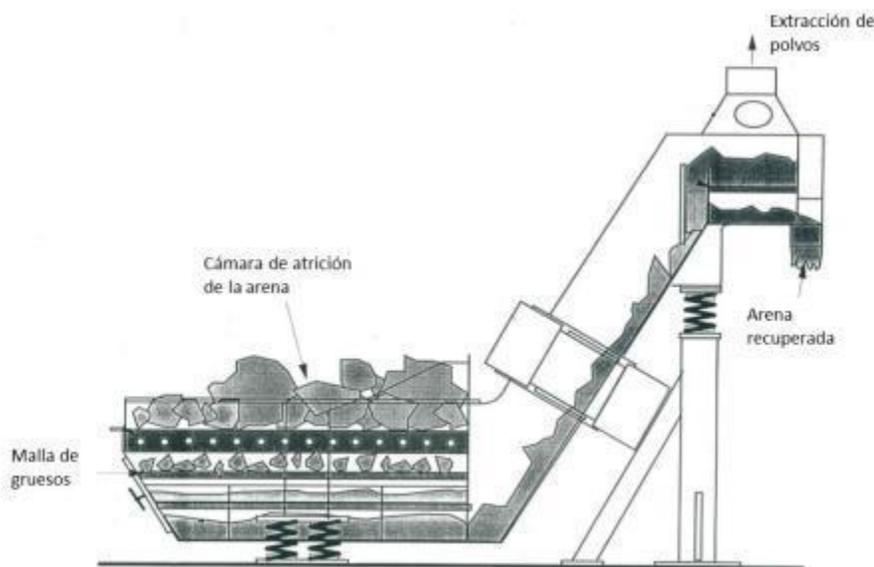


Figura 2.19 Equipo de atrición [39]

Recuperación neumática

Parecido al mecánico, estos equipos de recuperación atricionan la arena mediante la proyección de los granos contra las paredes internas del equipo por acción neumática, minimizando el desgaste de las partes metálicas.

El arrastre de los mismos se realiza en un gran volumen bajo una corriente de aire a presión y a través de una serie de celdas limpiadoras usualmente verticales. Con esto, el choque entre los granos simula una tormenta de arena en donde las películas adheridas a los granos son removidas.

Este proceso logra eliminar parcialmente la resina residual adherida en la superficie de los granos de arena por medio del rozamiento entre los granos y las paredes de la máquina, logrando minimizar angulosidades de los granos y redondeándola, reduciendo el contenido de resina hasta un 50%.

Recuperación húmeda

También llamado recuperación acuosa, este método consiste en el lavado de las arenas para la eliminación de componentes solubles en agua y remoción de arcillas y finos de arena, por lo que es un método idóneo para el proceso de moldeo de arena en verde o en el que se use la bentonita como aglutinante, al igual que con aglutinantes base silicato de sodio.

En este proceso, la arcilla se remueve de manera exitosa de los granos y las capas orgánicas que recubren ligeramente al grano son removidas. Los terrones de arena contaminada pasan por una corriente de agua para formar un lodo. Estos lodos se bombean a un clasificador cuya función es remover las partículas finas.

La arena lavada ya con un menor contenido de agua es llevada a una tolva de almacenamiento ubicada antes del circuito de flotación. Tiene mucha importancia entregar una alimentación estable a flotación ya que la dilución, los reactivos y el tiempo de residencia determinan la eficiencia del proceso [40].

La principal desventaja de este proceso es la separación de la arcilla del agua, lo cual es difícil y costosa de tratar. El secado de grandes cantidades de arena y las dificultades de disponer de efluentes hacen que eleve su costo, por lo que muchas fundiciones optan por evadir ese método.

Recuperación química

El método de recuperación por vía química se basa en agregar algún aditivo para acidificar, alcalinizar o neutralizar la arena, dependiendo del pH deseado. De acuerdo al proceso utilizado, es necesario controlar ciertas condiciones tales como el pH, ADV, etc., tal como ocurre en el proceso fenolico-uretánico, donde se necesita un rango de pH para que ocurra la reacción de formación de poliuretano.

Se ha reportado el uso de distintos ácidos como el cítrico y el fosfórico en el proceso de caja fría fenólico-uretánico para disminuir el pH de las arenas con una alta alcalinidad debido a la contaminación de éstas, así como eliminar impurezas de hierro de la sílice [41]. El uso de bajas concentraciones de estos ácidos es suficiente para neutralizar o disminuir el pH de las arenas y que así no puedan presentarse problemas en la fabricación de corazones.

Velazquez y col. [42] investigaron el uso del ácido cítrico para reducir el pH de las arenas de fundición que fueron recuperadas térmicamente y contaminadas con componentes alcalinos, disminuyendo la escala de pH hasta 0.9 unidades.

Además ha sido utilizado en arenas que contienen bentonita mediante la aplicación de ácidos como el sulfúrico, la cual permite recuperar la arena neutralizándola.

Recuperación biológica

La biodegradación de residuos es un término que describe su conversión por procesos biológicos enzimáticos a moléculas orgánicas e inorgánicas simples. A pesar de sus orígenes xenobióticos, el poliuretano se ha encontrado que es susceptible a la biodegradación por microorganismos, y el ataque enzimático podría ser contribuido por hidrolasas como ureasas, proteasas y esterases. Otros autores refieren la degradación de poliuretano sólido por bacterias y cuatro especies de hongos con la capacidad de degradar poliuretanos basados en éster [43].

Actualmente se está trabajando con hongos que han sido aislados de arenas de fundición contaminadas de poliuretano, los cuales han podido crecer en un medio mínimo mineral suplementado con poliuretano tipo poliéster, aun incluso sin haber fuentes adicionales de nutrimentos. En ellos se han

encontrado mayormente actividades enzimáticas ureasa y lacasa que podrían estar ligadas a la hidrólisis del poliuretano.

Recuperación mixta

Es la combinación de dos o más métodos de recuperación para una mayor remoción de la capa de aglutinante, sea orgánico o inorgánico. También se presenta cuando algún método presenta cierta desventaja y necesita ser contrarrestado usando otro. Ejemplos de éstas son: recuperación mecánica-térmica, húmeda-térmica, química-acuosa, etc.

Recuperación no convencional

El análisis de la literatura proporciona información sobre una búsqueda constante de nuevas formas de recuperación de la arena de fundición, con el fin de buscar métodos alternos a la recuperación convencional y proporcionar una mejor calidad de la arena recuperada.

Uno de los métodos es llevar la recuperación mecánica a temperaturas extra bajas, conocido como método criogénico. Este método podría eliminar de una mejor manera las “cáscaras” de resina residual en la arena y así disminuir su LOI [44].

2.10.3 Recuperación de la arena con silicato de sodio.

A través de las empresas de fundición se reconoce que es difícil la recuperación o re-uso de la arena usada recubierta con silicato de sodio. Es aceptado generalmente que el proceso de recuperación en seco es simple, pero

la calidad de la arena recuperada es pobre, y que el proceso de recuperación acuoso es complejo, pero la calidad de la arena es buena.

El proceso de reciclado en seco de la arena de fundición usada generalmente incluye rompimiento, desmagnetizado, clasificación, remoción de finos y polvo, enfriamiento, y el proceso puede ser recirculado muchas veces. El proceso de recuperación en húmedo o acuoso de la arena usada principalmente incluye la eliminación del aglutinante residual de la arena usada después del rompimiento, desmagnetizado y remoción de finos. La calidad de la arena recuperada por vía húmeda es cercana a la nueva arena.

Debido a las diferencias entre las arenas recuperadas en seco y acuosa en calidad y en requerimientos, sus procesos y equipos de reciclado son muy diferentes. En general, el proceso de reciclaje en seco es considerado el primer paso en el proceso de recuperación. El objetivo del proceso de recuperación acuoso o húmedo es eliminar los aglutinantes residuales de la superficie de los granos de la arena y hacer que la calidad de ésta esté cercana a las de arenas nuevas [45].

Características de la arena residual con silicato de sodio:

- Las capas de aglutinante residual de las partículas de arena con silicato de sodio no pueden ser quemadas o descompuestas a temperaturas de vaciado, pero más bien llega a ser una capa de gel de silicato de sodio la cual tiene un bajo punto de fusión y un fuerte enlace con la superficie de los granos de arena. Estas características explican la baja capacidad de descascarse.
- Debido al gel del silicato de sodio residual y las sales en la superficie, las partículas de arena usada poseen una más fuerte absorción al agua en la atmósfera y la arena llega a ser más complicada de recuperar en seco.
- La mayoría de los residuos que incluyen silicato de sodio, ésteres y sales resultantes en las partículas de la arena, son solubles en agua, por lo que

la mayoría de estos residuos pueden ser fácilmente arrastrados por el proceso de recuperación acuoso.

- En los procesos donde se cura el silicato de sodio con CO_2 , se forman carbonatos de sodio que se adhieren a los granos de arena y hace que su pH sea aún mayor.

Las prácticas e investigaciones por años muestran que hay tres principales métodos para el reacondicionamiento de la arena usada: proceso de recuperación en seco, proceso de recuperación en húmedo [45] y proceso de recuperación químico.

Como ya se mencionó, hay muchos tipos de métodos de recuperación en seco, incluyendo la recuperación mecánica, la recuperación neumática, recuperación por vibración, etc., pero en esencia tienen en común el principio de “colisión y fricción”. Cuando la colisión y fricción ocasiona una mayor resistencia que la resistencia a la cedencia o la resistencia de la unión de la película del aglutinante residual con la superficie del grano de arena, las capas residuales en las partículas de arena usada son destruidas o removidas, y después de la separación la arena recuperada en seco puede ser obtenida. Sin embargo, la abrasión y la excesiva colisión y fricción pueden ocasionar el agrietamiento de los granos de arena.

Las desventajas de la recuperación en seco de la arena usada son [46]:

- Posee una baja capacidad de remoción de aglutinante, aunque esta puede aumentar mediante el precalentamiento de la arena.
- Se obtiene una inferior calidad de arena recuperada.
- Se puede incrementar la resistencia por la re-adhesión del aglutinante y prolongar el trabajo de la arena recuperada. Además, el desarenado puede volverse más complicado.

Para la arena aglutinada con el aglutinante inorgánico base silicato de sodio, la recuperación mecánica puede llevar también a una re-activación del mismo aglutinante, esto con el fin de formar de nueva cuenta corazones de proceso inorgánico. Stachowicz y col. [47] sugieren que, usando la recuperación mecánica, será necesario compensar con una gran cantidad de silicato de sodio fresco para la reactivación del aglutinante. Czapla y col. [48] mencionan que es imposible lograr el 100% de la recuperación de la arena por la vía mecánica, al no eliminar completamente el aglutinante.

La recuperación térmica es suficiente para el caso de las arenas que fueron aglutinadas con resinas orgánicas. En el caso de las arenas unidas con aglutinantes inorgánicos, generalmente silicato de sodio, la recuperación térmica no será suficiente. Aquí, la recuperación generalmente tiene lugar en dos etapas: una primera etapa de regeneración mecánica y una segunda etapa de regeneración térmica [49]. Durante la regeneración mecánica, una gran fracción del aglutinante inorgánico se elimina de la superficie de los granos de arena. Sin embargo, quedan restos químicamente activos del aglutinante inorgánico. Estos restos del silicato de sodio activos se funden durante la regeneración térmica, y envuelven los granos de arena en una capa fina. Posteriormente se enfrían de nuevo y, por lo tanto, se desactivan térmicamente en gran medida. A continuación, la arena usada y regenerada se recicla. Después de la recuperación de la arena usada, se agregará un porcentaje de arena nueva. Se le conoce como un proceso de regeneración ya que el aglutinante inorgánico se vuelve a reactivar, para así poder formar de nueva cuenta moldes. Las desventajas de este proceso son que solo se puede usar durante pocos ciclos y que se tiene que usar una mezcla de arena nueva y arena regenerada.

Dargai y col. [50] investigaron el efecto en propiedades mecánicas y la granulometría al reusar la arena recuperada múltiples veces, encontrándose que el AFS se desplazó hacia la fracción de granos gruesos debido al reciclaje, mientras que las propiedades mecánicas fueron disminuyendo desde el primer hasta el quinto ciclo.

El silicato de sodio residual en la superficie del grano de arena es mayormente soluble en agua, por lo que cuando el agua es mezclada con la arena usada, los residuos serán disueltos (ver figura 2.20). Alguna de las ventajas de la recuperación acuosa es su alta capacidad de remoción del silicato residual y alta calidad de la arena recuperada, muy cercana a la arena nueva. Sus desventajas son que este proceso requiere equipos más complicados, además de la disposición de las aguas residuales de lavado.

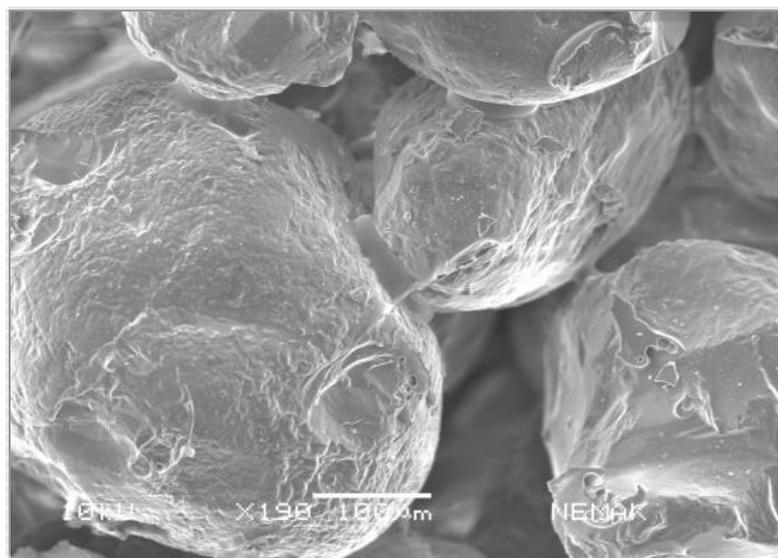


Figura 2.20. Granos de arena recubiertos con silicato de sodio

Fan y col. [51] mencionaron que mediante el uso de dos métodos de recuperación, mecánico y acuoso, se puede reducir con mayor facilidad la capa de silicato de sodio. La recuperación mecánica tiene un promedio de eliminación de silicato de hasta un 30%, mientras que apoyado con el proceso acuoso, se puede eliminar hasta un 90%.

Wolfgang y col. [52] patentaron un proceso combinado de recuperación térmica y acuosa para regenerar arenas pre-usadas por medio del quemado y lavado de residuos tanto orgánicos como inorgánicos. La arena tratada se puede usar con combinaciones de arena nueva y arena regenerada.

Ning Bo y col. [53] desarrollaron un método de regeneración de la arena usada con silicato de sodio mediante el lavado con agua caliente a 90°C de la arena usada y tamizada a mallas 20-40. Mientras tanto, Xianghua y col. [54] estudiaron la tecnología de recuperación térmica y acuosa de la arena, en donde mencionan el efecto de los tamaños de terrones de arena, la temperatura del agua y la agitación de la misma en la granulación de la arena. Descubrieron que, a mayor tamaño del terrón, la granulación será mayor; mientras que a mayor temperatura de agua de lavado y mayor tiempo de agitación, menor el tiempo de granulación.

Kumar y col. [55] concluyeron en la importancia de la relación arena-agua, determinando una relación de 1:1.5 para la obtención de valores uniformes de AFS y mejoras en la reducción del valor de pH. Kumar menciona además como al método de recuperación acuosa como un método verde sustituto del proceso de recuperación térmica.

Park y col. [56] analizaron dos tipos de arenas usadas con aglutinante inorgánico y un aditivo en polvo tratadas por recuperación húmeda: las arenas provenientes de moldeo y las arenas provenientes del vaciado. Las arenas fueron tratadas con una solución de KOH 0.2M y después fueron enjuagadas con agua. La arena de moldeo fue regenerada al mismo nivel que la arena de materia prima, removiendo la mayoría del aglutinante y el polvo. La arena de vaciado fue regenerada con la eliminación de la mayoría del aglutinante, sin embargo, un 78% del polvo quedó como remanente en la arena de vaciado. Yoeng y col. [57] demostraron que una solución básica fue capaz de remover el aglutinante inorgánico de la superficie de una arena artificial residual debido a la concentración de los iones hidroxilo durante la recuperación acuosa. La calidad de la arena regenerada por este método es similar a la arena artificial.

La cantidad de silicato de sodio en la arena usada es una fuente de contaminación, especialmente en las aguas residuales de la recuperación húmeda de la arena usada. Huafang y col. [58] estudiaron un nuevo proceso de recuperación acuosa mediante el tratamiento biológico de las aguas residuales

producidas durante el proceso de recuperación en húmedo de la arena usada. Se realizó un precultivo de *N. palea* y tres diferentes soluciones de lavado. Los resultados de la investigación primaria muestran que se obtiene una proporción de eliminación de silicato de sodio hasta un 90% en una proporción 1: 2 de arena y solución de lavado. Los resultados de la biomasa óptima, la disminución del valor de pH y el consumo de Na^+ y SiO_3^{2-} indican que las condiciones óptimas de incubación están en la irradiación de 5,000 luxes a 25 °C.

Los principales solutos en las aguas residuales que se descargan de la recuperación húmeda de la arena usada con silicato de sodio son el sodio, carbonato y bicarbonato de sodio, por lo que las aguas residuales se pueden convertir en lejía mediante un caustificación. En el proceso de caustificación el carbonato y bicarbonato de sodio inactivos se transforman en un químico activo, el hidróxido de sodio [59]. Fan y col. [60] mostraron que es factible tratar las aguas residuales vertidas por la regeneración húmeda a través del proceso de caustificación, y la tasa de caustificación podría ser superior al 92%. Wang y col. [61] demostraron que se puede reciclar el vidrio soluble (silicato de sodio) de las aguas residuales del proceso de recuperación acuosa por medio del proceso de caustificación.

Referencias

1. "Structure and composition of the Earth". Australian Museum, 14 de septiembre de 2007.
2. "Sand." World Book Encyclopedia. Chicago: World Book, 2000.
3. Smathers Jason. Sand mining surges in Wisconsin. *Wisconsin Watch*, 31 de julio de 2011.
4. Groover Michael. "Fundamentos de manufactura moderna". McGraw Hill, 4ª edición, 2007. 218 – 219.
5. Guichelaar P.J "Alternative granular media for the metal casting industry", 1995.
6. Cedillo Lizzet, "Arenas alternativas para la fabricación de moldes y corazones en la fundición de Aluminio", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2009.
7. Velazquez Juan Pablo, "Proceso de Corazones Nemak", Nemak México, 1997.
8. Saaid Ismail. "Characterization of Malaysia Sand for Possible Use as Proppant". Department of Geoscience and Petroleum Engineering, Universiti Teknologi Petronas, Malaysia, 2011.
9. "Mold and Core Test Handbook", American Foundrymen's Society, segunda edición, EE.UU, 1-7.
10. Sertucha J, Suárez R. "Materiales inorgánicos aplicados en la fabricación de piezas de fundición", Centro de Fundición Azterlan, Bizcaia. 2005.
11. Torres Carlos. "Sistemas de aglutinación química". Instituto Tecnológico de Saltillo. México. 1997.
12. Carey P. "Foundry Management & Technology. Sand Binder Systems" Ashland Chemical, Columbus, OH. 1990.
13. Hepburn C. "Polyurethane Elastomers". Elsevier Applied Science, 2a edición, 1992.
14. Recknagel U. "The Shell Moulding Process: A German Innovation" Gießerei-Praxis, 2007.

15. Sanders G. "GMBOND® sand binder system: Technical Review and Application Update".
16. Zaretsky L. "Modified Silicate Binders New Developments and Applications" *Inter Metalcast* 10, 2016, 88–99.
17. Tong K, Vinai R, Soutsos M. "Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders" *Journal of cleaner production* 201, 2018, 272-286.
18. Von Emmerich Weissenbek, "BMW-Leichtmetallgießerei setzt auf anorganisch gebundene Kerne", *revista Giesserei* No. 95, 2008.
19. Srinagesh K. "Chemistry of Sodium Silicate as a Sand Binder", University of Southeastern Massachusetts, 1979, 50 – 63.
20. McDonald M, LaRosa J. "Sodium Silicate a binder of 21st Century" The PQ Corporation®.
21. Steinhäuser T, Wolff A, "AWB - An environment friendly core production technology". Institut für angewandte Materialtechnik, Universität Duisburg, Essen, Germany.
22. Zhu Chun-Xi, "Recent advances in waterglass sand technologies" School of Material Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, P. R. China. 2007.
23. Avendaño J, "Influencia del pH en la adsorción de surfactantes catiónicos sobre diversas superficies rocosas" Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes, 2008.
24. He D, Xia L, Huang J, Shou Y. "Study of Environmentally Friendly Phosphate-Bonded No-Bake Sand" *Advanced Materials Research* 602-604, 2012.
25. Cobett T, "Core Making and the Use of Sodium Silicate", Cleveland, Ohio.
26. Dobosz S, Jelinek P, Major-Gabrys K, "Development tendencies of moulding and core sands". University of Science and Technology, Faculty of Foundry Eng., Krakow, Poland. 2011.

27. Skvara F, Jilek T, Kopecky L. "Geopolymer materials based on fly ash". Department of Glass and Ceramics, Institute of Chemical Technology Prague, Prague, Czech Republic. 2005.
28. Shehu T, Bhatti R. "The Use of Yam Flour (Starch) as Binder for Sand Mould Production in Nigeria". Department of System Engineering, University of Greenwich, UK 2012
29. Esquivel, A. "Desarrollo de un aglutinante orgánico para la fabricación de moldes y corazones de arena", Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2010.
30. "Complex Cavities in Casting Components with Salt-based Cores". CeramTec. 2016.
31. Sáenz, A. "Desarrollo de un aglutinante inorgánico para la producción de corazones de arena en la industria automotriz", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2010.
32. Beeley, P. "Foundry Technology", Butterworth-Heinemann, 2ª edición, 2001. 179-180.
33. "Beneficial reuse of foundry sand; a review of state practices and regulations". Sector Strategies Division Office of Policy, Economics, and Innovation U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC. 2002.
34. Hughes, D. "Reclaimed sands in foundries", FOSECO.
35. "Extracción de arena sílice en mina a cielo abierto en el predio Las Adelitas, localidad Cruz Colorada, municipio de Chignahuapan, Puebla". Némesis Asesores Ambientales. Gecomín. 68-70. 2017.
36. Carey, P. "Fundamentals of sand reclamation". ASK Chemicals, Dublin, Ohio.
37. Thermal reclamation (2020). Tinker Omega. Recuperado de <http://tinkeromega.com/category/thermal-reclamation-1>
38. Khan M, Mahajani S, Jadhav G. "Mechanical and thermal methods for reclamation of waste foundry sand". Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai, 400076, India. 2020.

39. Mechanical sand reclamation plant 1-3 t/h, second hand, Manufacturer RICHARDS Engineering/ SEGAB/ F.A.T. Ingenieurbüro Uwe Steffens. 2012.
40. "Sand washing plant for reducing clay contamination". AT Mineral Processing. 2013.
41. Zhang Z, Jingsheng L. "High efficiency iron removal from quartz sand using phosphoric acid". *International Journal of Mineral Processing* s 114–117:30–34. 2012.
42. Velazquez J.P., Ramírez M. "Dosificación de Ácido Cítrico para Reducir el Valor de pH en Arena Recuperada Térmicamente" Reporte interno Nematik, 2010.
43. Aguilar C, Treviño A, Garcia G, Velasco A. "Avances en la biodegradación microbiana de poliurteanos" Universidad Autónoma de Coahuila. *Revista CienciAcierta* 14-18. 2011.
44. Danko R. "Unconventional methods of reclamation of used moulding sands". Faculty of Foundry Engineering, AGH University of Science and Technology, Reymonta 23 str., 30-059 Kraków, Poland. *Archives of foundry engineering* Volume 10, 29-34. 2010.
45. Idamayanti D, Siswanto A. "Wet Reclamation for Improving Properties of Waste Silica Sand from Foundry", *International Journal of Engineering and Applied Sciences*. Volume-5, 2018, 19-22.
46. Kaminska J, Basinska E, Angrecki M. "Effect of mechanical reclamation cycle on strength parameters of loose self-hardening sands based on furfuryl resin", *Archives of Metallurgy and Materials*, 2018, 1843-1846.
47. Stachowicz M, Granat K, "Influence of wet activation of used inorganic binder on cyclically refreshed water glass moulding sands hardened by microwaves", Department of Foundry, Plastics and Automation, Wrocław University of Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego 25, 50-370 Wrocław, Poland, 2016.
48. Czapla P, Danko R, "The State of Art of the Mechanical Reclamation of Used Foundry Sands", *Archives of foundry engineering*, Volume 13, 15-20, 2013.

49. Schwickal, I (2016). "Method for regenerating the sand of sand molds and sand cores", Patente EE.UU. No.8,958,184 B2. Oficina de Patentes y Marcas de EE.UU.
50. Dargai V, Varga L, "Investigation of the Granulometric and Mechanical Properties of Inorganic Used Sand", International Journal of Engineering and Management Sciences Vol. 5, 2020.
51. Fan Z, Huang N, Wang H. "Dry reusing and wet reclaiming of used sodium silicate sand", School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, P.R. China. 2005.
52. Wolfgang, C (2008). "Process to regenerate sand pre-used in a metal casting process by burning and washing out organic and inorganic residues", Patente de Alemania DE102007008104A1.
53. Ning Bo, L (2013). "Recycling regenerating method of water glass used sand", Patente de China CN103056291A.
54. Xianghua L, "Study of Thermal and Wet Reclamation Technology of Used Sodium Silicate Bonded Sand" Advanced Materials Research (Volumes 1004-1005) 1008-1012, 2014.
55. Kumar P, Gopalsamy N, "Green Initiatives by Using Wet Reclamation Process in Foundry Industry", Nehru Institute of Engineering and Technology, Coimbatore – 641 105, India. International Journal for Scientific Research & Development| Vol. 3, Issue 01, 2015.
56. Park H, "Regeneration of used sand with sodium silicate binder by wet method and their core manufacturing", University of Ulsan, South Korea. Journal of Material Cycles and Waste Management. 2020.
57. Yoeng E, Kyeong H, Inseong H. "Wet regeneration of waste artificial sand used in sand casting using chemical solutions" Ulsan Division, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Korea. 2020.
58. Huafang W, Zitian F, Shaoqiang Y. "Wet reclamation of sodium silicate used sand and biological treatment of its waste water by *Nitzschia palea*", State

Key Laboratory of Material Process and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. 2012.

59. Montes O, "Producción de sosa cáustica por el método de caustificación", Universidad de Lima, Facultad de Ingeniería, Perú. 2008.
60. Fan Z, Wang L. "Study on causticizing process of sewage discharged from wet reclamation of waste sodium silicate sand". State Key Lab of Materials Processing and Die & Mold Technology, Huazhong. University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. 2018.
61. Wang L, Jiang W, Gong X. "Recycling water glass from wet reclamation sewage of waste sodium silicate-bonded sand". State Key Lab of Materials Processing and Die & Mold Technology, Huazhong. University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. 2019.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El proceso de recuperación de la arena se está volviendo una necesidad para las fundiciones. Este tipo de industrias no pueden seguir permitiéndose el pagar por arena nueva y, además, pagar por los servicios de transportación y disposición de la arena usada. El impacto ambiental debido a la explotación de las minas de arena sílice es otro factor que las fundiciones están empezando a tomar en cuenta con el fin de reducir los daños ambientales. Es por eso que la recuperación de la arena usada en las fundiciones toma fuerza cada día más para evitar todos estos factores mencionados.

3.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de la investigación llevada a cabo es el de desarrollar un proceso de recuperación de la arena de sílice recubierta con silicato de sodio, esto con el fin de eliminar, reducir o neutralizar la capa de silicato presente y que así esta arena pueda reutilizarse en un proceso fenólico-uretánico o de caja fría; así mismo, evaluar las propiedades mecánicas y la distorsión en caliente en caja fría de la arena recuperada por el proceso que mejor trabaje. Entre los procesos de recuperación a realizar están:

- Recuperación Química: adición de ácidos en la arena recubierta con silicato de sodio para poder llevar a cabo una reacción de neutralización y disminuir el valor de pH de la arena.
- Recuperación Mecánica: atrición o fricción entre grano y grano de arena con el fin de remover lo más posible la capa de silicato.
- Recuperación Acuosa: método de lavado de la arena con silicato de sodio para la posible eliminación de éste, aprovechando su solubilidad en agua.

La arena recubierta con silicato de sodio se obtuvo a partir de la mezcla de arena de sílice de proceso (previamente recuperada térmicamente) más la adición de un 2.0% de una solución de silicato de sodio de una relación 2:1 de $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$. Esta mezcla de arena-silicato se dejó secar para después llevar el desgranado de la arena endurecida mediante fricción, eliminando después los finos y partículas gruesas mediante un cribado. Una vez teniendo esta arena recubierta, se procedió a hacer mezclas de arena de proceso / arena recubierta con silicato a relaciones en peso de 25:75, 50:50 y 75:25.

Las mezclas de arena recuperada / arena recubierta pasan al proceso de recuperación, ya sea químico, mecánico o acuoso. Después de haber recibido este proceso, se analizó el pH de estas mezclas con el fin de obtener un valor necesario para poder realizar probetas hechas por el proceso de caja fría, las cuales deben de tener un pH óptimo entre 7 y 9. Una vez que han sido neutralizadas, se procedió a fabricar probetas por el proceso de caja fría y evaluar propiedades la resistencia a la tensión de éstas.

Teniendo el análisis de los resultados, se escoge el mejor proceso de recuperación y se realizan otras pruebas como distorsión en caliente y resistencia mecánica a altas humedades. El proceso se muestra en la figura 3.1.

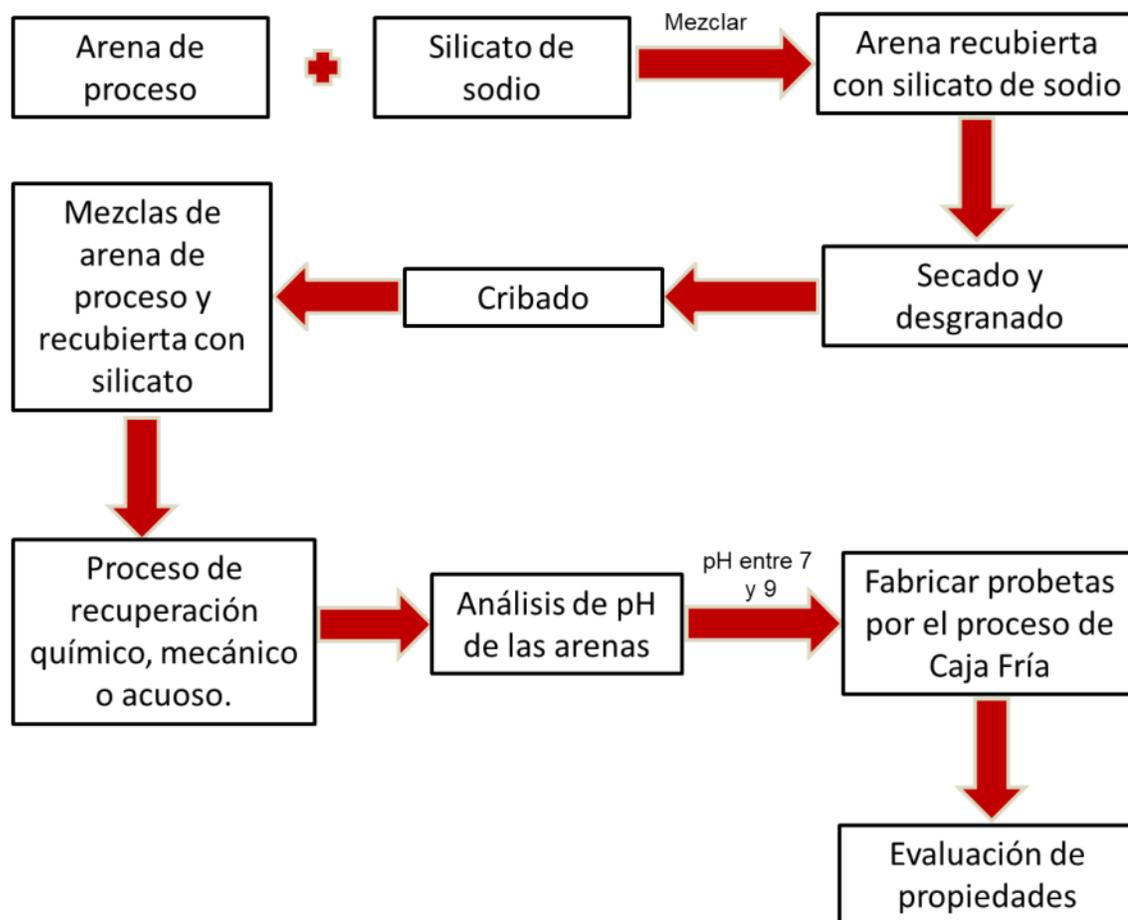


Figura 3.1 Proceso para pruebas de recuperación de la arena recubierta con silicato de sodio.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ARENAS

Distribución de grano, morfología, pH y valor de demanda de ácido (ADV) fueron las propiedades analizadas tanto para la arena recuperada como para la arena recubierta con silicato de sodio. Tres tipos de arenas fueron usadas durante la etapa de experimentación:

1. Arena de proceso (AP): Es la arena usada en el proceso normal de fabricación de corazones por el proceso de caja fría, la cual fue previamente recuperada térmicamente. Figura 3.2.



Figura 3.2 Arena de proceso que fue recuperada térmicamente.

2. Arena recubierta con silicato de sodio (ARSS): Es la arena la cual fue usada para producir corazones por el proceso inorgánico, con silicato de sodio como aglutinante.

3. Arena del proceso inorgánico recuperada por vía química, mecánica y/o húmeda (AIR): Es la arena la cuál fue tratada por medio de aditivos químicos, por atrición mecánica y/o por lavado la cual logró ser recuperada mediante la disminución de su pH.

3.2.1 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.

Debido a la finura de grano y la distribución de las partículas, éstas influyen de manera importante en las propiedades físicas de la arena, tales como resistencias, permeabilidad, tendencia a defectos por expansión de arena, etcétera.

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 (ver figura 3.3). El resultado indica si la arena es de tipo gruesa, mediana o fina. El procedimiento a seguir fue el de la norma AFS 1106-00-S, de acuerdo a la *American Foundry Society* [1].

Tipos de arena de acuerdo a su tamaño de grano:

a) Arena gruesa

AFS entre 20 y 50 con un contenido de finos menor a 3%. Este tipo de arenas tienen una menor área superficial, por lo que se necesita menor cantidad de resina para recubrir el grano, mejorando la permeabilidad del corazón y proporcionando una mayor fluidez a la mezcla.



Figura 3.3 Equipo de tamización por vibrado Ro-tap.

b) Arena fina

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

Con el fin de poder determinar el tamaño de grano promedio o finura AFS, se coloca una pequeña muestra de arena en una serie de tamices de diferentes tamaños de malla, para después hacerlos vibrar alrededor de 15 minutos en el tamizador de partículas Ro-Tap. La Tabla 3.1 muestra la relación entre el número de malla y el tamaño de apertura de cada malla.

Tabla 3.1 Relación entre tamaño de apertura y número de malla [2].

Apertura (μm)	Número de malla
850	20
600	30
425	40
300	50
212	70
150	100
106	140
75	200
53	270
38	400

3.2.2 Morfología

Los granos de arena se pueden clasificar en redondos, angulares y sub-angulares. Entre más redondo sea el grano, menor área superficial tendrá y menor será la cantidad de aglutinante usado, además que tendrá menor permeabilidad. La forma de grano es una de las propiedades de la arena más fundamentales para la producción de corazones y moldes. La cantidad de resina o aglutinante a agregar dependerá directamente de esta condición.

Mediante el uso del estereoscopio Olympus SZH10 (Figura 3.4) fue posible observar la morfología del grano de arena que se utilizó, además de la que fue atricionada mecánicamente.



Figura 3.4 Estereoscopio Olympus SZH10.

El microscopio óptico marca Keyence VHX (Figura 3.5) se utilizó además con el fin de observar posibles puentes y defectos presentados.



Figura 3.5 Microscopio óptico marca Keyence.

El análisis de capas de silicato y fracturas fue realizado mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB) marca JEOL JSM-6360LV (Figura 3.6). Además, de las muestras analizadas, se seleccionaron tres áreas de interés en las cuales se determinó de manera semicuantitativa la composición química de los granos de arena recubiertos y tratados.



Figura 3.6 Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6360LV.

3.2.3 Medición de pH y ADV

La alcalinidad o acidez de las arenas antes y después de recuperar se mide agitando por 5 minutos 50 g de muestra de arena en 100 mL de agua destilada y ajustada a pH 7. Todo esto de acuerdo al procedimiento de la norma de la *American Foundry Society* AFS 1114-00-S [1].

En cuanto a la demanda de ácido (ADV), se titulan, mediante agitación vigorosa por 5 minutos y usando una solución de NaOH 0.1 N, 50 g de arena con 50 mL de agua destilada mas 50 mL de una solución de HCl 0.1N, hasta obtener un valor de pH neutro, tomando los mililitros necesarios de hidróxido de sodio para neutralizar la solución. Este procedimiento es de acuerdo también a lo que indica la norma de la *American Foundry Society* AFS 1114-00-S [1].

Para la medición de pH y ADV se utilizó un pH-metro Thermo Scientific Orion Star serie A211 (Figura 3.7). Los análisis de pH fueron llevados a cabo a temperatura ambiente, entre 21 y 25°C.



Figura 3.7 pH-metro Thermo Scientific Orion Star.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLUTINANTES

El silicato de sodio usado para fabricar la arena recubierta se caracterizó mediante viscosidad y FTIR. Las propiedades físicas de los silicatos varían ampliamente de acuerdo a la relación entre el SiO_2 y el Na_2O . El pH también depende de que tan grande sea esta relación. El silicato de sodio usado para esta experimentación fue de una relación 2:1.

En cuanto a las resinas de caja fría, tanto la parte 1 como la parte 2, se caracterizaron mediante viscosidad, FTIR y TGA. Las resinas de caja fría usadas fueron la resina parte 1 [3] y la resina parte 2 [4].

3.3.1 Viscosidad

Para la determinación de la viscosidad, se usó un viscosímetro portátil Viscolite VL700 modelo S21 (figura 3.8) con un rango de medición de 0 a 10,000 cP [5]. Los análisis de viscosidad fueron llevados a cabo a temperatura ambiente, entre 21 y 25°C.

Las muestras analizadas fueron el silicato de sodio [6] y las resinas parte 1 y parte 2 de caja fría.



Figura 3.8 Viscosímetro portátil Viscolite VL700.

3.3.2 Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)

Esta técnica proporciona un espectro de reflexión de las bandas de los grupos funcionales de las sustancias inorgánicas y orgánicas, por lo cual es posible realizar una identificación de los materiales.

Las muestras, todas líquidas, fueron analizadas por espectrofotometría de infrarrojo en un equipo marca Perkin-Elmer, Figura 3.9. Los espectros fueron registrados por 16 escaneos a una resolución de 4 cm^{-1} . Las lecturas espectroscópicas se realizaron a una resolución de 4000 a 600 cm^{-1} .



Figura 3.9 Espectrofotómetro de Infrarrojo por Transformada de Fourier Perkin Elmer Spectrum 100.

3.3.3 Análisis Termogravimétrico (TGA)

La termogravimetría es un tipo de prueba que se realiza en muestras para determinar cambios en su peso en relación a cambios en la temperatura.

La degradación térmica de las resinas fue llevada a cabo en un TGA Shimadzu 50 (Figura 3.10), en un rango de temperatura de 25 a 900 °C bajo una atmósfera de argón empleado como gas inerte. La velocidad de

calentamiento fue de 20 °C/min y se utilizó un crisol de platino con 20 mg de la muestra.



Figura 3.10 Analizador Termogravimétrico 50 Shimadzu

3.4 RECUBRIMIENTO DE ARENA CON SILICATO DE SODIO

Para empezar a usar los distintos métodos de recuperación, es necesario tener primeramente la cantidad suficiente de arena de sílice recubierta con el silicato de sodio (ARSS). Se tiene que adicionar cierto porcentaje de silicato a la arena, para después formar probetas curadas mediante el proceso de caja caliente. Estas probetas son desgranadas mediante fricción entre ellas y así poder obtener la arena recubierta. Finalmente se clasifica la arena, separando las partículas más gruesas y finas resultantes para obtener una granulometría a la usada en el proceso de fabricación de corazones. A continuación se presenta

más detallado el proceso de fabricación del recubrimiento de la arena con el silicato.

3.4.1 Curado por caja caliente

Como ya se ha explicado, el proceso de caja caliente consiste en la fabricación de probetas o corazones de arena, usando una caja con resistencias eléctricas, vapor de agua o aceite caliente, con el fin de promover el curado del corazón. En el caso del proceso del aglutinante inorgánico, la deshidratación del silicato genera la formación de puentes de silicato que unen los granos de arena, desarrollando entre los corazones y probetas resistencias muy altas.

En cuanto al tiempo y temperatura de curado del corazón, eso depende del tamaño y forma. Sin embargo, es necesario para el proceso del aglutinante inorgánico eliminar toda el agua presente para así formar un corazón completamente curado y altamente resistente. Las temperaturas de curado deben estar por encima de los 100°C y no sobrepasar los 170°C. A temperaturas mayores, se pierde resistencia y se obtienen corazones de mala calidad. Para la elaboración de probetas, 3 minutos de curado son suficientes para que haya una buena unión entre los puentes de silicato de sodio deshidratado y los granos de arena de sílice. La figura 3.11 muestra el equipo caja caliente utilizado en el desarrollo de la presente tesis.



Figura 3.11 Sopladora Redford de caja caliente para elaboración de probetas.

3.4.2 Procedimiento para elaboración de arena recubierta con silicato

Se parte de una mezcla de arena – silicato, en donde el tipo de arena que se utilizó es la recuperada térmicamente usada para la fabricación de corazones. Después de pesar alrededor de 3 kilogramos de arena, se agrega un 0.5% de aditivo base etil-silicato y se agita en un mezclador de arena Hobert (Figura 3.12) por espacio de un minuto. Enseguida se agrega un 2.0% de la mezcla de silicato de sodio y se mezcla por un minuto. Una vez teniendo la mezcla de arena y aglutinante, se sopla en la caja caliente o sopladora Redford con una presión de soplado de 0.70 MPa, 3 minutos de tiempo y a 150°C de temperatura de curado, obteniendo por cada soplo tres probetas tipo guitarras o dog-bones en inglés (Figura 3.13).



Figura 3.12 Mezclador de arena – resina Hobart.

Después de tener varias probetas con aglutinante inorgánico para poder juntar suficiente arena recubierta, éstas se desgranán, raspando los corazones sobre una superficie rugosa o entre ellos mismos. Los granos de arena resultante se hacen pasar por mallas intermedias para separar conglomerados y pedazos grandes de arena o corazones, así como los finos presentes; esto con el fin de tener una granulometría parecida a la de la arena recuperada de proceso que tiene un AFS entre 48 y 52.

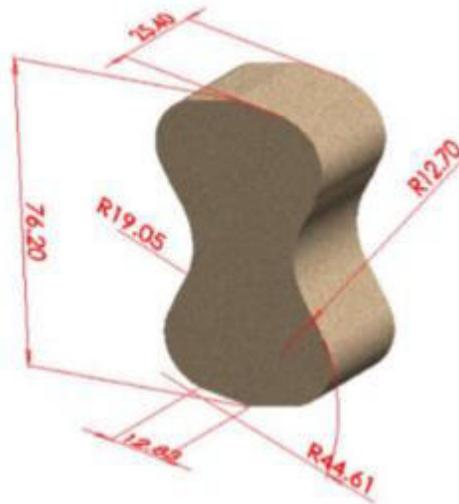


Figura 3.13 Dimensiones de probeta tipo dog bone.

Una vez teniendo la suficiente arena recubierta con silicato de sodio, ésta se mezcla con arena de proceso recuperada térmicamente a diferentes proporciones: 25, 50 y 75%. Estas mezclas de arena serán las utilizadas para la matriz de experimentos de los distintos métodos de recuperación a realizar.

3.5 MÉTODOS DE RECUPERACIÓN

Con la finalidad de eliminar, reducir o neutralizar el silicato de sodio presente sobre los granos de arena, se decidió usar tres métodos distintos reportados en el capítulo 2:

- Recuperación Química
- Recuperación Mecánica
- Recuperación Acuosa

3.5.1 Recuperación Química

El método de recuperación por vía química se basa en agregar algún aditivo para acidificar, alcalinizar o neutralizar la arena, con el fin de poder reutilizarse en algún otro proceso. Como ya se ha mencionado, para que ocurra la reacción del proceso fenolico-uretánico, se necesitan controlar ciertas condiciones, tal como el valor de pH y ADV.

La arena debe de tener un pH entre 7 y 9 para que ocurra la reacción de polimerización sin que se presenten problemas de resistencia mecánica. Al ser el silicato de sodio un compuesto altamente alcalino, la arena recubierta tendrá un pH alrededor de 11 y 12, por lo que es necesario el uso de un ácido para neutralizarla.

Según la teoría de Brønsted–Lowry [7], un ácido es un donante de protones y una base es un aceptor de protones. En estas definiciones, el término protón se refiere al ion de hidrógeno, H^+ . Un ácido es una especie que contiene un átomo de hidrógeno ácido, que es un átomo de hidrógeno que puede transferirse como núcleo, un protón, a otra especie que actúa como una base.

Distintos ácidos orgánicos e inorgánicos fueron utilizados para buscar la manera de neutralizar el sodio presente en la arena debido al silicato. Los ácidos orgánicos usados están asociados a ácidos carboxílicos comunes e inclusive presentes en la naturaleza, así como reportados en bibliografía para arenas de fundición [8]. Los ácidos inorgánicos que fueron utilizados también en estas pruebas son comunes y fáciles de conseguir, además de que se ha reportado su uso para recuperar la arena con altos valores de pH (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Ácidos usados en la recuperación química

Recuperación Química	
ácidos orgánicos	ácidos inorgánicos
cítrico	clorhídrico
acético	sulfúrico
láctico	nítrico
fórmico	fosfórico

La Tabla 3.3 muestra las pruebas con los distintos ácidos usados a 25, 50 y 75% de arena recubierta con silicato de sodio (ARSS), usando como porcentajes de los ácidos un 0.1, 0.3 y 0.5% en peso de la arena total.

Además se realizaron las pruebas testigo sin ningún ácido a 0, 25, 50, 75 y 100% de arena recubierta con silicato de sodio (ARSS), como lo muestra la Tabla 3.4.

Tabla 3.3 Diseño de pruebas para el uso de ácidos en la arena recubierta con silicato de sodio

Aditivos	Arena recubierta con silicato	% de aditivo	Aditivos	Arena recubierta con silicato	% de aditivo
Ácido Cítrico	75%	0.1	Ácido Clorhídrico	75%	0.1
		0.3			0.3
		0.5			0.5
	50%	0.1		0.1	
		0.3		0.3	
		0.5		0.5	
	25%	0.1		0.1	
		0.3		0.3	
		0.5		0.5	
Ácido Acético	75%	0.1	Ácido Sulfúrico	75%	0.1
		0.3			0.3
		0.5			0.5
	50%	0.1		0.1	
		0.3		0.3	
		0.5		0.5	
	25%	0.1		0.1	
		0.3		0.3	
		0.5		0.5	
Ácido Láctico	75%	0.1	Ácido Nítrico	75%	0.1
		0.3			0.3
		0.5			0.5
	50%	0.1		0.1	
		0.3		0.3	
		0.5		0.5	
	25%	0.1		0.1	
		0.3		0.3	
		0.5		0.5	
Ácido Fórmico	75%	0.1	Ácido Fosfórico	75%	0.1
		0.3			0.3
		0.5			0.5
	50%	0.1		0.1	
		0.3		0.3	
		0.5		0.5	
	25%	0.1		0.1	
		0.3		0.3	
		0.5		0.5	

Tabla 3.4 Diseño de pruebas sin uso de ácidos

Aditivo	Arena recubierta con silicato	% de aditivo
-----	100%	---
	75%	---
	50%	---
	25%	---
	0%	---

En un recipiente se agregaron 100 gramos de la mezcla de arena recubierta con silicato y arena recuperada térmicamente. A esa mezcla se le añadió 0.1, 0.3 ó 0.5% del ácido concentrado y se agitó vigorosamente. De ahí se tomaron 25 g de muestra y se le mide el pH. Esto se volvió a hacer hasta tener tres repeticiones. De aquí se buscaba tener una arena con un pH entre 7 y 9 para poder determinar cuál aditivo y en que concentración representaba la mejor opción para fabricar corazones con resina de caja fría usando las mezclas de arena recubierta con silicato de sodio. Figura 3.14.

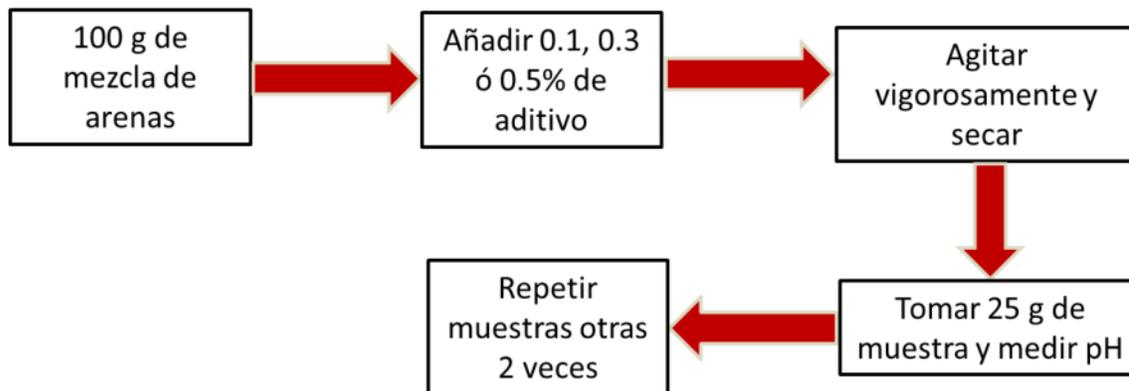


Figura 3.14 Proceso de adición de aditivos ácidos a las mezclas de arena y silicato

3.5.2 Recuperación Mecánica

El método de recuperación por vía mecánica se basa en atricionar los granos de arena recubiertos para poder reusarla. La atrición mecánica en las fundiciones representa uno de los métodos de recuperación más ampliamente usados, debido a su efectividad en la remoción parcial de la capa de resina presente sobre los granos, disminuyendo su contenido orgánico y así poder reusarla en el proceso de elaboración de moldes y corazones.

El objetivo de la recuperación mecánica en los granos de arena recubiertos con silicato de sodio es reducir el pH de esta arena, mediante la eliminación parcial o total de la capa de silicato, mediante la ruptura de esta capa unida fuertemente a la arena de sílice por medio de atrición.

El molino de mortero RM 200 mostrado en la figura 3.15 es utilizado para realizar pruebas a nivel laboratorio para la recuperación de arena por medio de atrición. Las variables del equipo son la presión ejercida por el pistilo, posición del pistilo hasta obtener una pérdida por ignición adecuada para la mezcla con arena recuperada térmicamente. En este equipo se puede ajustar la presión ejercida de acuerdo a la escala de dureza, además de mover el pistilo hacia la pared para ejercer menor o mayor presión, otra variable también es el tiempo y los ciclos de atrición los cuales deben simular el proceso de atrición del equipo Sand Mold System.



Figura 3.15 Molino de mortero Retsch RM 200

Para las pruebas de laboratorio usando el molino Retsch, las variables utilizadas fueron el ajuste del pistilo a cinco diferentes presiones, el tiempo y los ciclos de atrición. La posición del pistilo fue mantenida constante. La Tabla 3.5 muestra las distintas variables del proceso de atrición de la arena recubierta con silicato utilizadas a escala laboratorio.

Tabla 3.5 Diseño de pruebas para recuperación mecánica

Presión	tiempo de atrición (min)	% de arena recubierta con silicato
1	1	25
		50
		75
	5	25
		50
		75
2	1	25
		50
		75
	5	25
		50
		75
3	1	25
		50
		75
	5	25
		50
		75
4	1	25
		50
		75
	5	25
		50
		75
5	1	25
		50
		75
	5	25
		50
		75

Después de atricionar la arena a diferentes tiempos y presiones, se mide el AFS o distribución de grano, al igual que los porcentajes de finos. Los finos a partir de malla 140 son removidos y el resto de la arena se utiliza para un segundo y tercer ciclo de atrición, donde en cada ciclo se va a analizar distribución de grano y finos. Al igual que en el primer ciclo, en el segundo y

tercero se eliminan los finos, esto debido a que esos finos pudieran ser, aparte de arena, silicato de sodio desprendido del proceso de atrición.

Finalizando los 3 ciclos, se procede a lavar la arena con agua destilada para eliminar la probable acumulación de finos sobre la superficie de los granos de arena. Después del lavado, la arena se seca, se deja enfriar a temperatura ambiente y se mide pH. La figura 3.16 muestra el diagrama del proceso de las pruebas por recuperación mecánica de la arena recubierta con el silicato de sodio.

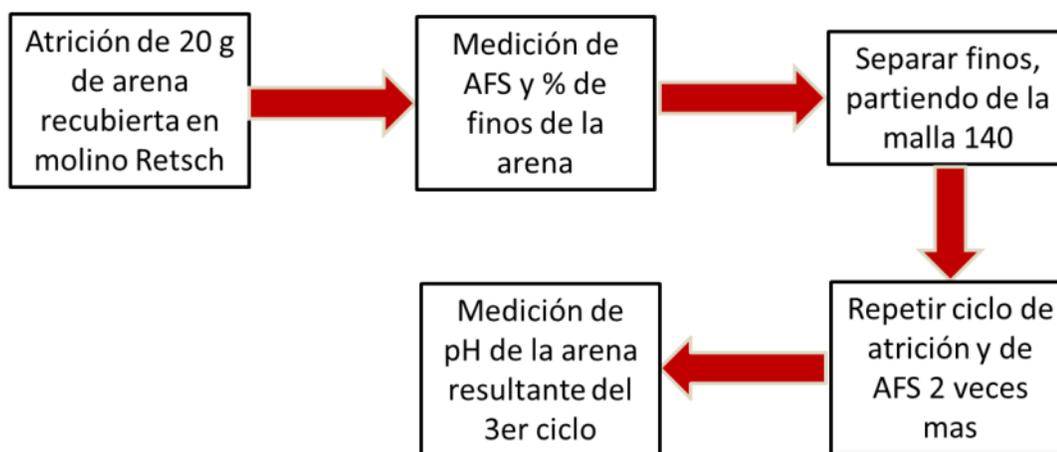


Figura 3.16 Proceso de recuperación por atrición

3.5.3 Recuperación Acuosa

La recuperación húmeda o acuosa recibe este nombre debido a que la arena se hace pasar por un tratamiento de lavado vigoroso. Este método normalmente se usa cuando se le quiere dar a la arena un tratamiento especial después de haber sido retirada de la mina, como por ejemplo eliminar o reducir su alto contenido en arcillas o carbonatos y otras sales. El lavado puede ser realizado con distintos tipos de aguas, además de que se puede realizar un

lavado acidulado para neutralizar los componentes alcalinos y así reducir su alto valor de pH.

El silicato de sodio, al ser soluble en agua, puede ser eliminado directamente de los granos de arena mediante este tipo de recuperación por lavado. Al eliminar toda la capa del silicato de sodio presente sobre los granos de arena, será posible disminuir su pH y que ésta arena lavada tenga las propiedades muy parecidas a la arena nueva; inclusive mejores. Un proceso de secado posterior al lavado tendrá que ser utilizado para que la arena se pueda usar para fabricar corazones con resina de caja fría.

Para el proceso de recuperación acuosa se utilizaron tres condiciones distintas de lavado a diferentes tiempos: lavado con agua a temperatura ambiente, con agua caliente y con una solución diluida de HCl. Fueron utilizados 15, 30 y 45 minutos de agitación con otros 2 ciclos de lavado de 10 minutos para asegurar la completa disolución del silicato de sodio en los granos de arena. La relación en peso entre el agua y la arena fue de 2:1.

El agua utilizada para los tres diferentes tipos de lavado fue usando agua potable. La Tabla 3.6 muestra el análisis químico de dicha agua. El lavado con agua caliente se lleva a cabo llevando el agua a casi su punto de ebullición, esto para aumentar la solubilidad del silicato de sodio; no obstante, el agua solo fue calentada a ebullición antes de adicionarla a la arena, no fue un calentamiento constante. Después de este lavado con agua caliente, se enjuaga usando otros 2 ciclos de 10 minutos con agua potable a temperatura ambiente.

Tabla 3.6 Calidad química del agua

Parámetro	Valor
pH	7.5
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}^2$)	730
Turbidez (FAU)	60
Hierro soluble (ppm)	2
Dureza por calcio (ppm)	35
Dureza por Magnesio (ppm)	10
Dureza total (ppm)	45

En cuanto al lavado ácido, se utilizó una concentración de HCl de 0.5N, un ácido muy comúnmente utilizado para el lavado de arenas de las minas con alto contenido de arcillas. El lavado con una solución diluida de ácido clorhídrico a la arena recubierta con silicato de sodio no solo ayuda a la disolución de este, sino que además promueve la reacción entre el ácido y el silicato, neutralizando la arena. Es importante completar otros 2 ciclos de lavado de 10 minutos para eliminar todas las trazas de ácido que queden en la arena, además de las sales formadas por la reacción entre el silicato y el ácido (Figura 3.17).

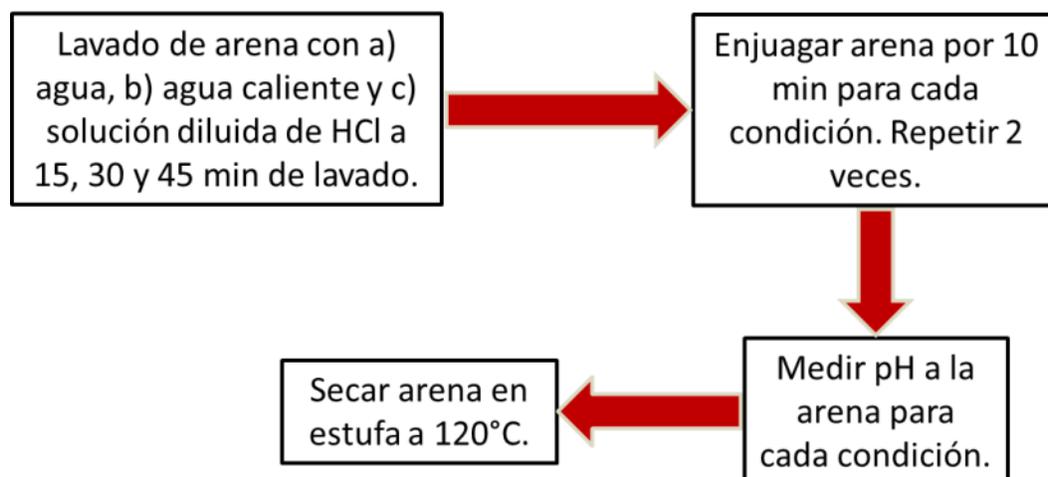


Figura 3.17 Proceso de recuperación por lavado

Para cada ciclo es necesario medir el pH del agua residual del lavado realizado y comprobar cómo el valor de pH va disminuyendo conforme se va lavando la arena recubierta. En el último ciclo de cada tipo de lavado se mide no solamente el pH del agua sino también de la arena ya seca. La Figura 3.17 muestra el diagrama básico de recuperación de arena por vía húmeda y en la Tabla 3.7 se muestra el diseño de pruebas para cada condición.

Tabla 3.7 Diseño de pruebas para recuperación húmeda

Condición	% de arena recubierta con silicato	1er ciclo	2o ciclo	3er ciclo
		tiempo (min)	tiempo (min)	tiempo (min)
Agua a 25°C	25	15	10	10
		30		
		45		
	50	15		
		30		
		45		
	75	15		
		30		
		45		
Agua caliente	25	15	10	10
		30		
		45		
	50	15		
		30		
		45		
	75	15		
		30		
		45		
HCl 0.5N	25	15	10	10
		30		
		45		
	50	15		
		30		
		45		
	75	15		
		30		
		45		

3.6 FABRICACIÓN DE PROBETAS POR EL PROCESO DE CAJA FRÍA

Una vez teniendo la arena ya tratada y recuperada por los distintos métodos de recuperación, se escogen las pruebas que resultaron disminuir el pH lo suficiente como para fabricar probetas por el proceso de caja fría.

Dependiendo del método de recuperación usado para eliminar o neutralizar la capa de silicato de sodio presente sobre los granos de arena, se escogen los parámetros más importantes de cada método para fabricar las probetas en las que se realizarán los ensayos de propiedades mecánicas:

- a) Recuperación química: Se escogen los ácidos que lograron disminuir el pH entre 7 y 9, ya sean inorgánicos u orgánicos y a la concentración tanto de la arena recubierta como la del ácido que lo lograron bajar. Dependiendo de la capacidad del ácido de neutralizar al pH deseado, se usa 0.1, 0.3 o 0.5% de ácido con un 25, 50 ó 75% de arena con silicato de sodio para fabricar las probetas.
- b) Recuperación mecánica: Dependiendo de la presión del pistilo y el tiempo de atricionado de la arena en el molino y del pH resultante entre 7 y 9, se fabrican las probetas para caja fría ya sea con un 25, 50 ó 75% de arena recubierta con silicato.
- c) Recuperación acuosa: Después de cada tercer ciclo de lavado, se analiza el pH de tanto el agua de lavado como de la arena, entre las tres condiciones: agua a temperatura ambiente, agua caliente y una solución de HCl 0.5N. Las probetas se fabrican dependiendo de que tanto baja el pH a cierto tiempo de agitación (15, 30 ó 45 minutos) ya sea con un 25, 50 o 75% de arena recubierta con silicato de sodio.

3.6.1 Procedimiento de mezclado arena-resina

El procedimiento para la elaboración de probetas por el proceso de caja fría inicia agregando 3000 gramos de arena a un recipiente metálico, seguido de la adición del 1.0% en peso de la arena de la resina total (0.5% de parte 1 y 0.5% de parte 2). Primeramente se adiciona a la arena 0.5% de la parte 1 y se agita en el mezclador de arena Hobart por espacio de 1 minuto. La parte 2 se adiciona con un 0.5% y se agita por 1 minuto al igual que la parte 1. Una vez teniendo la mezcla de arena-resina, se mandan a la máquina sopladora para la obtención de suficientes probetas para realizar los ensayos y determinar las propiedades mecánicas.

3.6.2 Caja fría

Como ya se ha mencionado, el proceso de caja fría se refiere al curado a temperatura ambiente de la mezcla de arena y aglutinante catalizado por un gas, el cual pasa a través de la arena. Este proceso sigue la secuencia típica de soplado, gaseado, purga y extracción del corazón.

Las resinas usadas son una Parte 1 (resina fenol-formaldehído) y una Parte 2 (dimetil-isocianato), ambas usadas en relación 50/50. El gas catalizador es una amina terciaria. Las arenas utilizadas son la arena de proceso recuperada térmicamente; las arenas recuperadas por los métodos químico, mecánico y acuoso usando un 25, 50 y 75% de arena recubierta con silicato de sodio; y arena recubierta 100% con silicato, como se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Materiales a usar para la fabricación de probetas por caja fría.

Mezcla de Arenas	Resinas	Gas catalizador
0% AIR - 100% AP 25% AIR - 75% AP 50% AIR - 50% AP 75% AIR - 25% AP 100% AIR - 0% AP	Parte 1 Parte 2	Amina terciaria

AP - Arena de proceso

AIR - Arena del proceso inorganico recuperada
por vía química, mecánica ó húmeda

Se utilizó una máquina sopladora Redford para la fabricación de las probetas de laboratorio tipo guitarra o dog-bone para realizar los ensayos de propiedades mecánicas. Los parámetros de soplo son 0.70 MPa de soplo, 2 segundos de tiempo de soplo y 15 segundos de tiempo de gaseo y purga.

3.7 ENSAYOS MECÁNICOS

Los ensayos a los que se someten las probetas, una vez que han sido fabricadas a partir de la mezcla de arena-resina, están estandarizados de acuerdo a las normas de la American Foundry Society. Estos ensayos pueden ser mecánicos, físicos, dimensionales, químicos o térmicos. La geometría y el tipo de probeta van a depender del ensayo que se realizará.

3.7.1 Propiedades mecánicas

Las propiedades más importantes que tienen los moldes y corazones de arena son las propiedades mecánicas, ya que implica la capacidad en que estos van a resistir al momento de ser extraídos, manejados, transportados y ensamblados. Algún agrietamiento o porosidad en los corazones podría

ocasionar que éste colapse al momento de ser utilizado y que pueda generar defectos importantes en la pieza debido a estas imperfecciones en el corazón. Además, los corazones tienen que tener una alta capacidad de almacenamiento y resistencia a altas humedades relativas presentes en el ambiente, esto para que puedan resistir suficientes días antes de ser usados.

La resistencia a la tensión es la prueba mecánica principal realizada en esta experimentación. La probeta de tensión es usada en ciertos casos para validar la densidad del corazón. Las probetas de tensión comúnmente llamadas dog-bones o guitarras usadas en estos ensayos, tienen las dimensiones que se muestran en la Figura 3.18.



Figura 3.18 Probetas de tensión.

Los ensayos de resistencia mecánica a la tensión fueron realizados a condiciones de laboratorio (30% de humedad relativa y a 23°C). Se utiliza un tensómetro digital para corazones Thwing Albert. Figura 3.19.



Figura 3.19 Máquina de tensión de probetas Thwing Albert

Como se mencionó anteriormente, es importante que los corazones de arena sean lo suficientemente resistente a diferentes condiciones ambientales, por ejemplo a altas humedades relativas, debido a la alta higroscopicidad del silicato de sodio). Para realizar las pruebas de resistencia a la tensión a altas condiciones ambientales, es necesario el uso de la cámara húmeda, en donde se controla el porcentaje de humedad relativa y la temperatura. Las probetas tipo guitarras se introducen en el equipo a 25°C y a un 90% de humedad relativa, simulando condiciones extremas de humedad. Estas se retiran de la cámara a ciertas horas y se mide la resistencia a la tensión. La Figura 3.20 muestra la cámara húmeda.



Figura 3.20 Cámara de humedad controlada ESPEC

Los ensayos para evaluar las propiedades mecánicas de un corazón o de una mezcla de arena-resina son las siguientes:

- a) Resistencia inmediata: es la resistencia que tiene el corazón inmediatamente después de que ha sido fabricado y extraído de la sopladora.
- b) Desarrollo de resistencia: es la resistencia a la tensión medida en MPa que tiene el corazón después de un tiempo de que ha sido fabricado. Esta propiedad es de suma importancia debido a la manipulación y manejo de los corazones al momento de vaciarse. En laboratorio normalmente se mide el desarrollo de resistencia a 1, 2 y 24 horas usando el tensómetro digital para probetas Thwing Albert a condiciones de laboratorio y/o condiciones de alta humedad y temperatura.

- c) Vida de banco: es un indicativo de la vida útil de la mezcla de arena y resina. En este ensayo, como en el desarrollo de resistencia, se miden las propiedades mecánicas a la tensión después de que ha pasado media o una hora desde que la mezcla se fabricó, usando el mismo tensómetro digital para probetas Thwing Albert.

3.7.2 Distorsión en caliente

En este tipo de prueba se van a obtener datos como el cambio de dimensión que ocurre en una probeta de arena al momento de calentarse, simulando los cambios dimensionales que presentarían los corazones y moldes de arena al momento de vaciarse el metal líquido. Se considera como una de las pruebas más importantes dentro de la industria de la fundición debido a la gran cantidad de información que ésta genera. La Asociación Británica de Investigación en la Fundición de Hierro (BCIRA por sus siglas en inglés) diseñó el equipo capaz de medir esta propiedad.

Se utilizan barras delgadas como probetas para medir la distorsión en caliente, las cuales van a ser expuestas a una flama con una relación aire-gas estándar (14.5:1). La probeta o barra tiene dimensiones de 25 x 6.35 x 114 mm. Ver Figura 3.21.

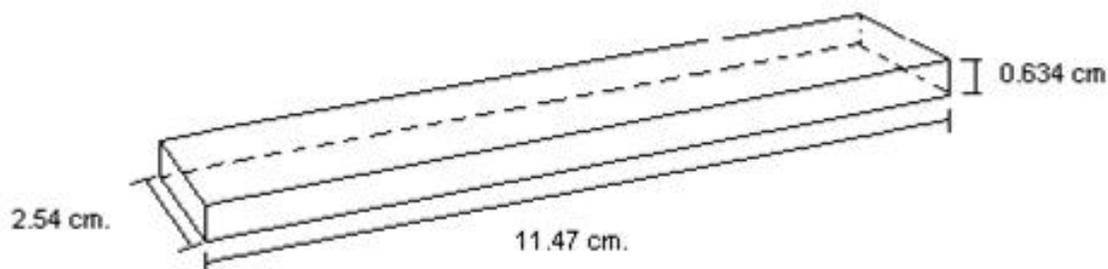


Figura 3.21 Probeta de distorsión en caliente (ensayo BCIRA)

La prueba de distorsión en caliente consiste en sujetar por un extremo la probeta rectangular y calentarla fuertemente en el centro de la cara inferior mediante un 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 va ganando calor, ésta sufre una serie de eventos que son registrados por un sensor y son plasmados en una gráfica. Figura 3.22.



Figura 3.22 Equipo de distorsión en caliente BCIRA marca Simpson

En esta prueba se obtiene la expansión máxima de la barra, su plasticidad causada por el poliuretano y el tiempo máximo de ruptura expuesto a la flama.

En un esquema de distorsión (Figura 3.23) en caliente se aprecian cuatro áreas o regiones principales, cada una de las cuales representa una propiedad desarrollada por la muestra:

- a) Región I: Es la expansión que sufre la probeta al ser expuesta por la flama.
- b) Región II: Expansión máxima y velocidad de expansión de dicha probeta.
- c) Región III: Es la regida por el fenómeno de termoplasticidad y termoendurecimiento, las cuales son propiedades de los materiales poliméricos, en este caso del poliuretano formado. Está en función del tipo y cantidad de resina utilizada.
- d) Región IV: Colapsabilidad de la probeta.

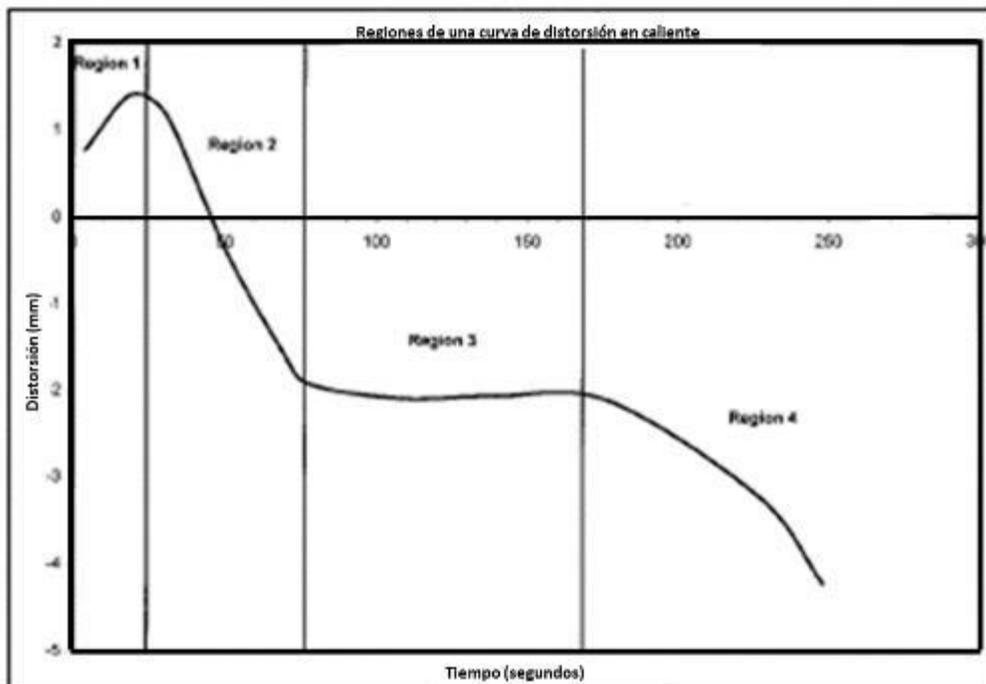


Figura 3.23 Esquema de distorsión en caliente.

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.

En cuanto a los factores que deben tomarse en cuenta al realizar la prueba de distorsión en caliente, éstos son: tipo de arena, AFS, tipo de resina, temperatura y tiempo de curado, y densidad del corazón o probeta.

Referencias

1. "Mold and core test handbook". American foundry society. 2nd Edition. E.U.A. 2000.
2. Michaud D, "Tools of a Metallurgist". Mesh to Micron conversion. 911 Metallurgist. 2014.
3. Hoja de Seguridad de la resina parte 1 Caja Fría. HA International. Sigma Cure NKMTY 110 UCB Pt1.
4. Hoja de Seguridad de la resina parte 1 Caja Fría. HA International. Sigma Cure NKMTY 210 UCB Pt2.
5. Viscolite VL700 Portable Viscometer. User manual. Hydromotion viscosity. 2008.
6. Hoja de Seguridad del silicato de sodio. D TM Sodium Silicate Solution. PQ Corporation.
7. Brown T y cols. "Química. La ciencia Central" Pearson Educación. Novena Edición. México 2004.
8. Velazquez J.P., Ramírez M. "Dosificación de Ácido Cítrico para Reducir el Valor de pH en Arena Recuperada Térmicamente" Reporte interno Nemark, García, Nuevo León, México. 2010.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en la caracterización de arenas y aglutinantes así como de los resultados de los distintos métodos de recuperación utilizados para la arena recubierta con silicato de sodio; así como el desarrollo de resistencia mecánica de las probetas fabricadas con resina de caja fría y arena ya recuperada.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ARENAS

La arena de proceso recuperada térmicamente fue utilizada para recubrirla con silicato de sodio y también fue recuperada por los métodos químico, mecánico y acuoso; así como para fabricar probetas de caja fría usando la arena ya recuperada.

La caracterización realizada a la arena no recubierta y recubierta con silicato de sodio es importante debido a que las propiedades mecánicas varían de acuerdo a la naturaleza de éstas. Entre las pruebas realizadas para su caracterización están la distribución granulométrica, morfología, pH y ADV.

4.2.1 Distribución granulométrica

La distribución granulométrica indica la distribución del tamaño de los granos; sin embargo, se tiene más precisión al tener un acumulado por mallas, que en total suman nueve más el fondo. Esta prueba se realizó con el equipo Ro-Tap.

En la Tabla 4.1 y en la Figura 4.1 se muestra la distribución granulométrica de una muestra de 200 g de arena de proceso recuperada térmicamente, la cual ha sido una muestra tomada al azar y cuarteada para tener una composición lo más homogénea posible.

El AFS o tamaño de grano promedio resultante es de 46 (número de malla), con un porcentaje de finos del 0.1%, lo que indica que es una arena mediana con una mínima cantidad de finos presentes.

Tabla 4.1 Distribución granulométrica de la arena de proceso recuperada térmicamente

Arena recuperada					
No.de Malla	Total Acumulado	Retenido por malla			
		Gramos	%	Factor	Producto
20	0	0.00	0.00	12	0
30	0.3	0.30	0.2	20	3
40	27.9	27.60	13.84	30	415
50	112.8	84.90	42.58	40	1703
70	174.8	62.00	31.09	50	1555
100	195.9	21.10	10.58	70	741
140	199.2	3.30	1.65	100	165
200	199.4	0.20	0.10	140	14
270	199.4	0.00	0.00	200	0
Fondo	199.4	0.00	0.00	300	0
Total	199.4	199.40	100		4596

AFS	% Finos
46	0.10

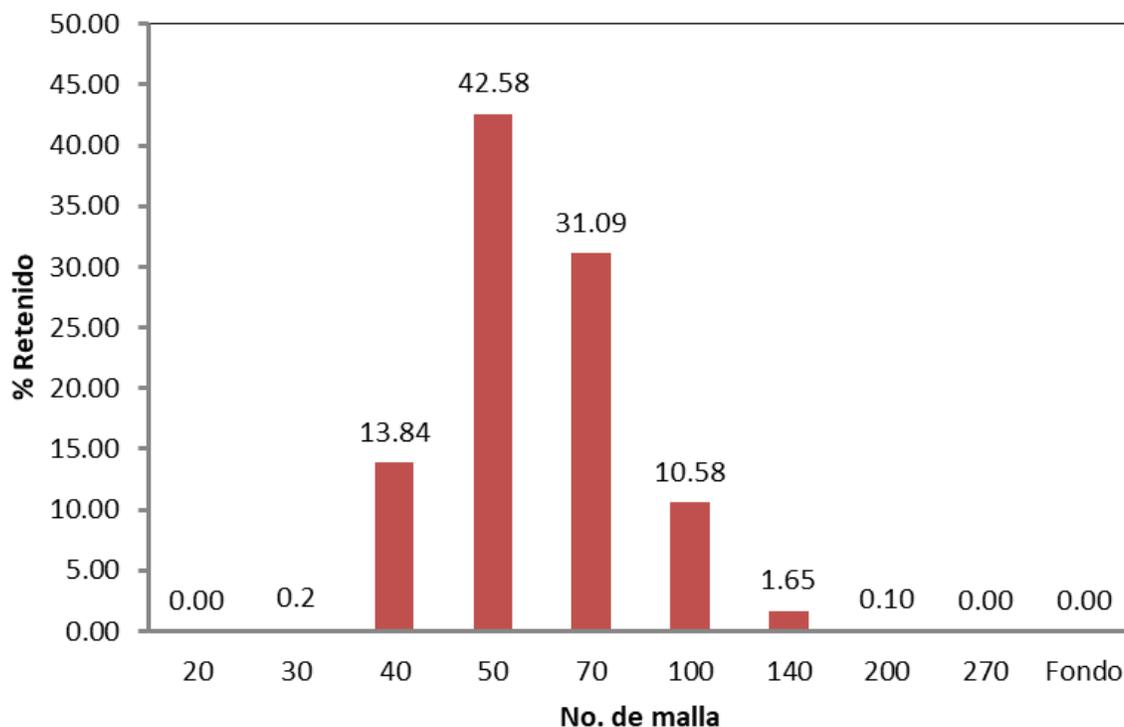


Figura 4.1 Gráfica de la distribución granulométrica de la arena

4.2.2 Morfología

La morfología redonda es la más común para la fabricación de corazones debido a su área superficial [1] y que no es necesaria tanta cantidad de resina como en el caso de la arena con morfología angular.

Se obtuvieron imágenes de los granos (ver Figura 4.2) mediante el estereoscopio, donde se aprecia la forma de grano de la arena de proceso recuperada térmicamente. La tonalidad amarillenta o anaranjada es debida precisamente a la resina presente en los granos que fue quemada durante el proceso de vaciado o durante el proceso de recuperación térmica.

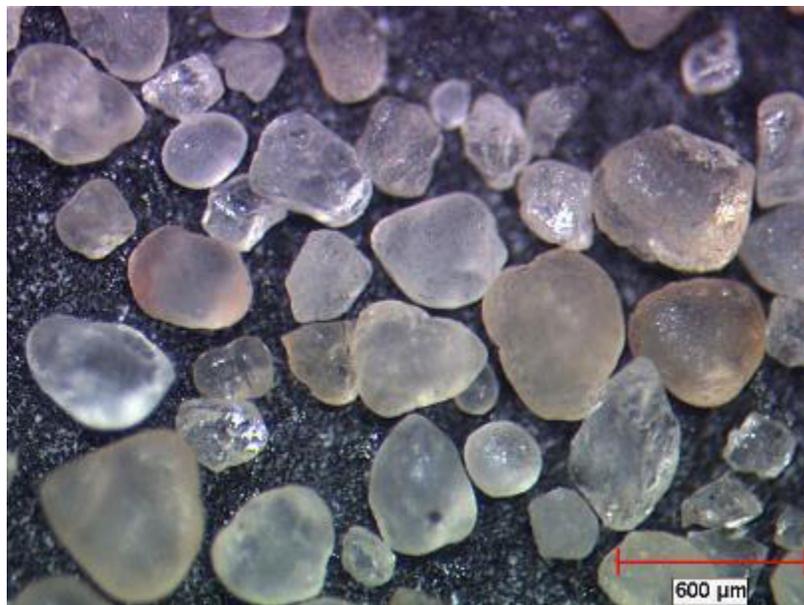


Figura 4.2 Morfología de los granos de arena de proceso

4.2.3 Medición de pH y ADV

El valor de pH de las arenas utilizadas representa uno de los principales factores en este trabajo, debido a que a la presencia de silicato de sodio en los granos de arena, además de contaminantes alcalinos, aumenta el valor de pH de la arena considerablemente. Como se ha mencionado, para el proceso de caja fría se recomienda un intervalo de pH de trabajo entre 7 y 9, debido a que son condiciones idóneas para que ocurra la reacción fenólica-uretánica. La arena de sílice nueva normalmente tiene un pH neutro, sin embargo, al estar ésta ya en proceso y también al estar en contacto con contaminantes alcalinos como óxidos, este tiende a aumentar.

En cuanto al ADV o demanda de ácido, es un factor importante para determinar la presencia de compuestos alcalinos que no son solubles en agua y no se pueden medir directamente con el pH, pero que son solubles en ácido y que se mide en mililitros de éste. De acuerdo a las especificaciones de proceso, un ADV mayor a 5 mL de ácido afecta las condiciones de reacción y por ende, la producción de corazones.

Los resultados de pH y ADV muestran que la arena de proceso recuperada térmicamente tiene un pH de 8.9 y un ADV de 1.8 mL.

4.2.4 Composición química

Al ser arenas de sílice con las que se trabajó, se tiene que la mayoría de su composición es dióxido de silicio, con algo de contenido de alúmina, óxido de hierro y trazas de óxidos de sodio, magnesio y calcio.

La Tabla 4.2 muestra la composición química tanto de arena nueva como de la usada en este trabajo arena de proceso recuperada térmicamente. También se muestra la arena recubierta con silicato de sodio. Además se muestra el contenido de pérdidas por ignición (LOI), el pH y ADV para cada tipo de arena, métodos fundamentales para su caracterización [2].

Tabla 4.2 Composición química y propiedades de arena nueva y arena de proceso

Compuesto	Arena nueva	Arena recuperada térmicamente	Arena recubierta con silicato
% Si ₂ O	98.32	94.35	94.28
% Al ₂ O ₃	0.87	4.13	4.07
% CaO	0.08	0.21	0.19
% Fe ₂ O ₃	0.09	0.41	0.43
% K ₂ O	0.15	0.25	0.24
% Na ₂ O	0.06	0.09	0.26
% Otros	0.43	0.56	0.53
pH	6.8 - 7.2	7.0 - 9.0	10.2 - 11.0
ADV	< 1.0 mL	1.0 - 5.0 mL	> 5.0 mL

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLUTINANTES

Las resinas de caja fría, además del aglutinante inorgánico base silicato de sodio, fueron caracterizadas mediante pruebas térmicas, espectroscópicas, de viscosidad, pH y contenido de sólidos.

4.3.1 Viscosidad y pH

La viscosidad de las resinas suele ser un parámetro de importancia en las fundiciones debido a que ésta se toma como parte del control de calidad de la materia prima. Si las viscosidades de ambas partes de la resina de caja fría disminuyen mucho, significa que hay un aumento en contenido de solventes, por lo que será menor la unión entre grano y poliuretano y por lo mismo, una menor resistencia mecánica del corazón.

Tabla 4.3 Valores de viscosidad, pH y contenido de sólidos del silicato de sodio

Viscosidad (mPa.s)	pH	% de sólidos
450	12.7	45

El valor de viscosidad promedio para el silicato de sodio fue de 450 mPa.s, mientras que el pH fue de 12.7 y su contenido de sólidos fue de 45% (Tabla 4.3).

En cuanto al silicato de sodio, la viscosidad y el pH están en función de la relación $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ [3]. A mayor contenido total de sólidos, la viscosidad aumenta, y más si hay una mucha mayor relación de SiO_2 que de Na_2O .

4.3.2 Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier

La espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier permite la identificación de los grupos funcionales de componentes orgánicos e inorgánicos, en este caso de todos los aglutinantes usados.

El espectro de la parte 1 del proceso de caja fría se muestra en la Figura 4.3. En este se observa a la longitud de onda de 3500 cm^{-1} la banda ancha del grupo hidroxilo, $-\text{OH}$, proveniente del fenol y una banda alrededor de los 1750 cm^{-1} característico del grupo carbonilo, $-\text{C}=\text{O}$, proveniente del formaldehído [4].

La figura 4.4 muestra el espectro de la parte 2 de las resinas del proceso de caja fría, donde se puede observar una banda intensa a los 2300 cm^{-1} de longitud de onda, el cual corresponde al enlace isocianato, $-\text{N}=\text{C}=\text{O}$, siendo el grupo funcional fundamental para la síntesis del poliuretano [4].

El espectro de la Figura 4.5 corresponde a una solución acuosa de silicato de sodio usado para la formación de corazones con el aglutinante inorgánico. El pico agudo a la longitud de onda de 1050 cm^{-1} y el pequeño a 550 cm^{-1} son los enlaces, $\text{Si}-\text{O}$, del silicato. Las bandas a 3500 y 1600 cm^{-1} se deben a la presencia del agua de la solución [5].

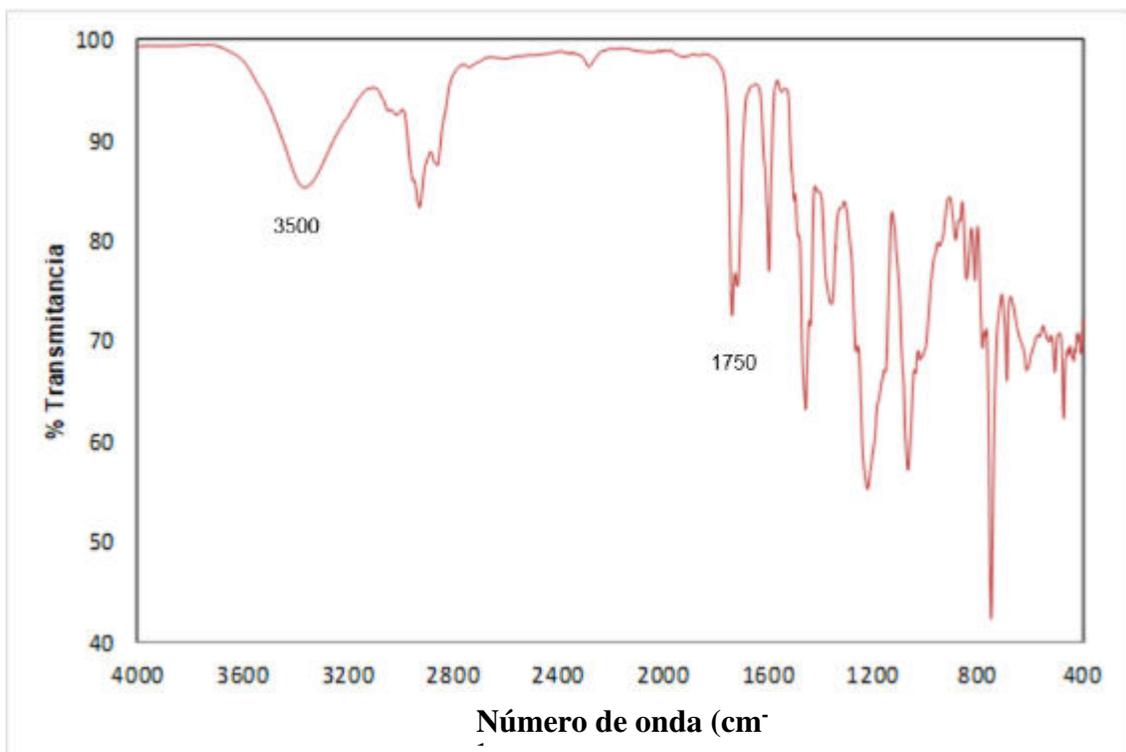


Figura 4.3 Espectro de infrarrojo de la resina de caja fría parte 1.

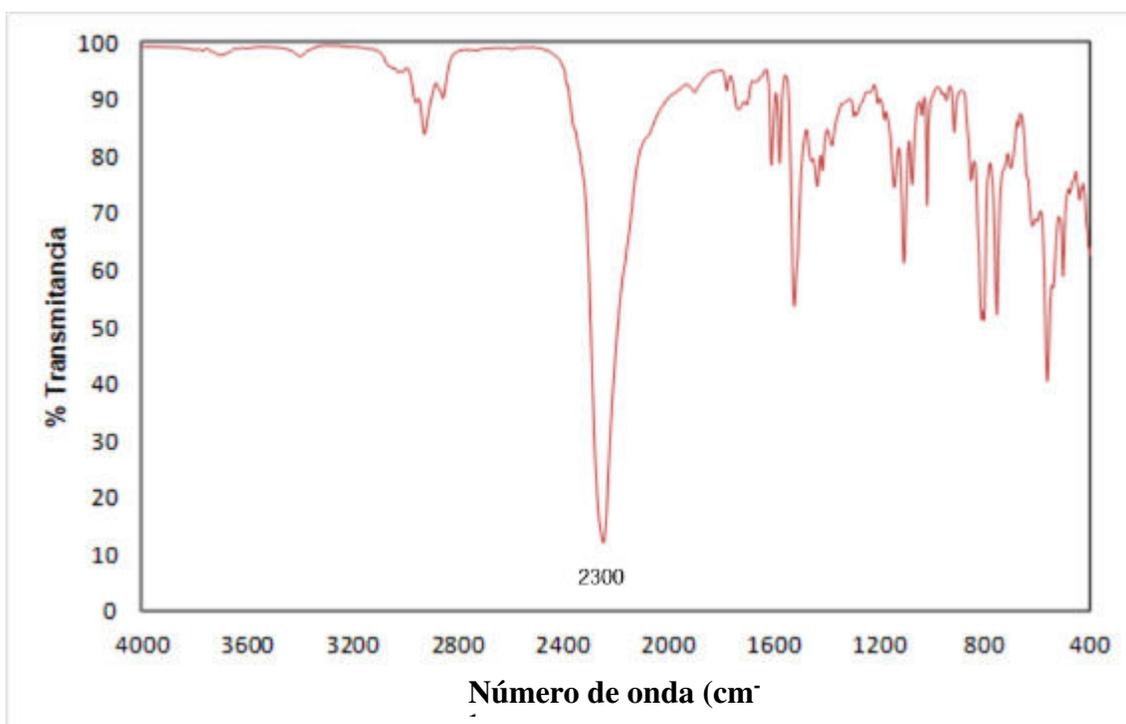


Figura 4.4 Espectro de infrarrojo de la resina de caja fría parte 2.

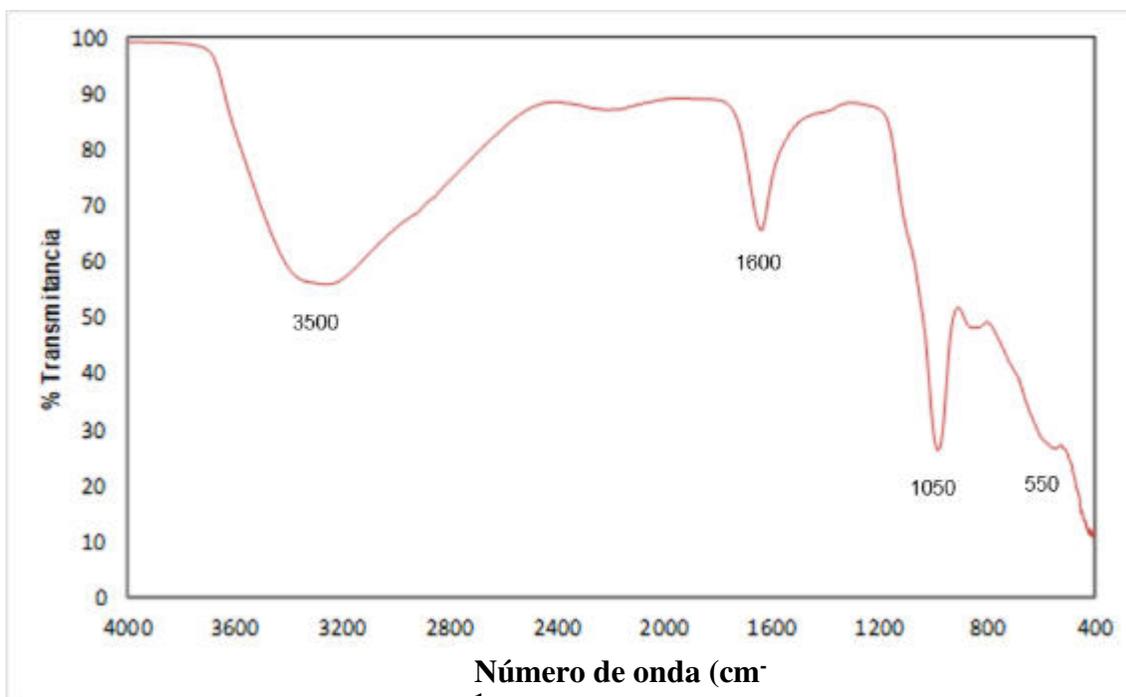


Figura 4.5 Espectro de infrarrojo la solución de silicato de sodio.

4.3.3 Análisis Termogravimétrico

El análisis termogravimétrico (TGA) evalúa la estabilidad térmica de las resinas de caja fría, así como el contenido de sólidos de la solución de silicato de sodio. La figura 4.6 muestra los resultados obtenidos del análisis termogravimétrico de las resinas de caja fría parte 1 (CB-P1) y parte 2 (CB-P2), además la solución de silicato de sodio (INO) usada para el recubrimiento de granos de arena de proceso recuperada térmicamente.

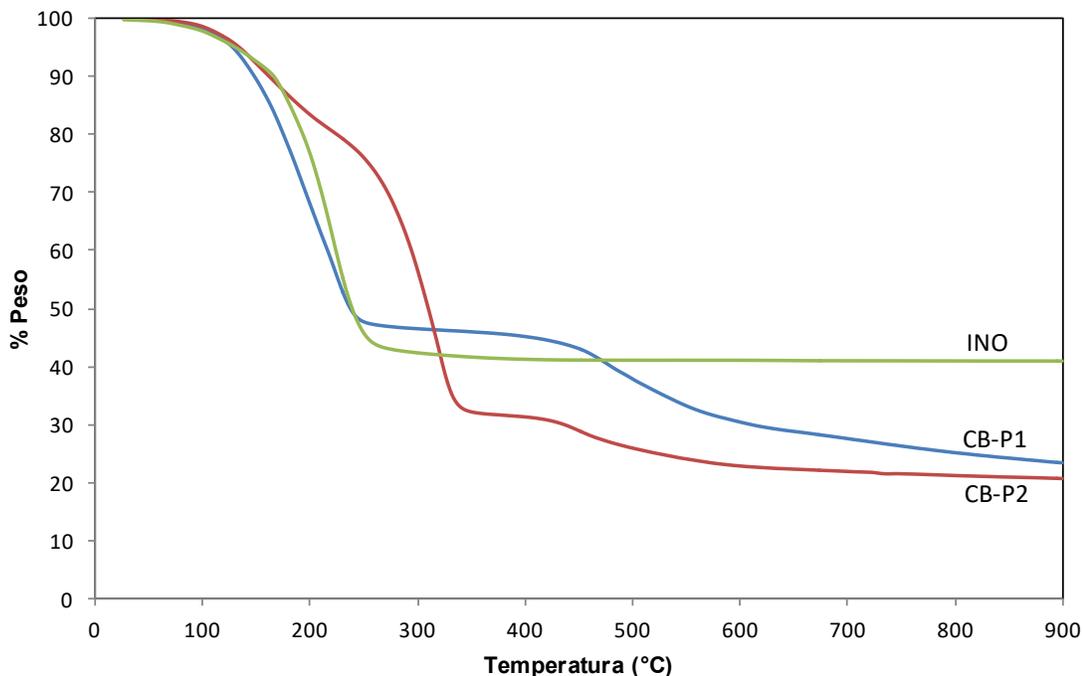


Figura 4.6 Análisis termogravimétricos de los aglutinantes orgánicos e inorgánicos.

A temperaturas menores de 200°C, para las resinas de caja fría ocurre la evaporación de solventes y compuestos de bajo peso molecular presentes, mientras que para el aglutinante inorgánico base silicato de sodio ocurre la evaporación de agua [6].

El rango de temperatura de 200 a 400°C corresponde a la descomposición de compuestos de mediano peso molecular para las resinas de caja fría parte 1 y parte 2. En ese intervalo de temperatura prácticamente el contenido de silicato de sodio es sólido, evaporándose en su totalidad el agua unida física y químicamente. De 400 a 900°C ocurre la descomposición total de las resinas de caja fría.

Tabla 4.4 Pérdida de peso de los aglutinantes según el rango de temperatura $[(\Delta WW)*100]$.

Compuesto	Rango de Temperatura (°C)			Remanente
	23-200	200-400	400-900	
CB-P1	32.6	22.2	21.8	23.4
CB-P2	16.7	52.1	10.6	20.6
INO	24.0	34.8	0.3	40.9

Como se observa en la Tabla 4.4, en la resina parte 1 ocurre una evaporación de solventes considerable a temperatura menores de 200°C, mientras que en la resina parte 2 apenas hay un 16.7% de pérdida en peso total. Para el rango de temperatura entre 200 y 400°C, la resina parte 2 presenta una descomposición de componentes orgánicos de hasta el 52.1%, mientras que la parte 1 hay una pérdida de un 22.2%. Hay un remanente final de 23.4% para la parte 1 y un 20.6% para la parte 2 (Figura 4.7).

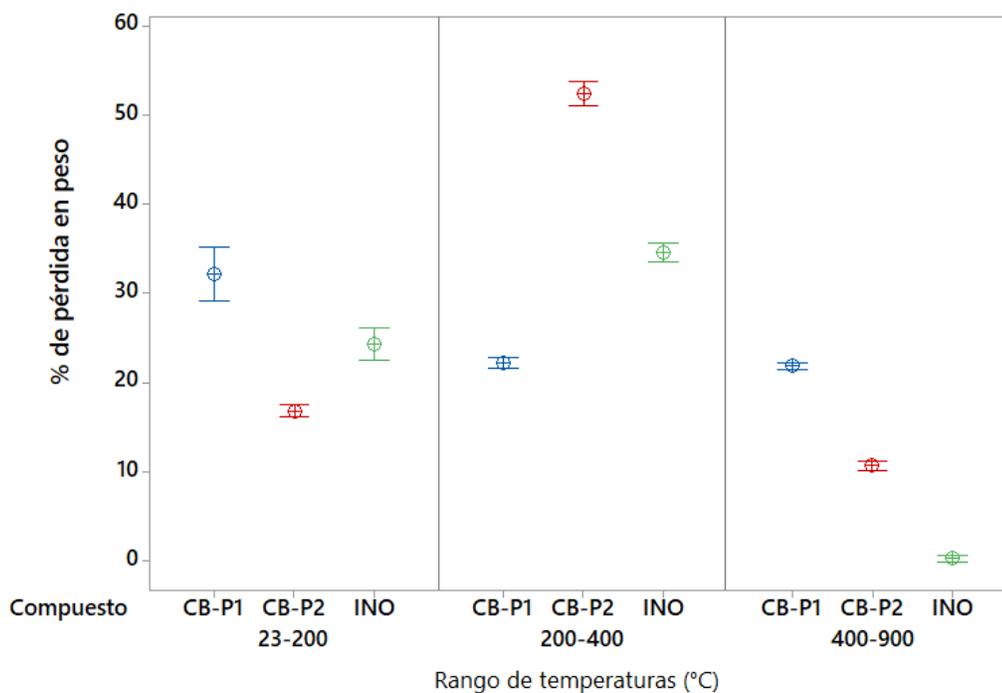


Figura 4.7 Porcentaje de pérdida en peso por rangos de temperatura para cada compuesto.

En cuanto a la solución de silicato de sodio, se registra una pérdida en peso de 24.0% a temperaturas menores a 200°C, y en el rango de 200 a 400°C ocurre una pérdida del 34.8%, siendo esta pérdida del agua que está unida químicamente al silicato de sodio. Al final se tiene que la muestra de la solución de silicato presenta un 40.9% de sólidos y un 59.1% de agua total. Estos datos se reflejan en la Figura 4.7 y 4.8.

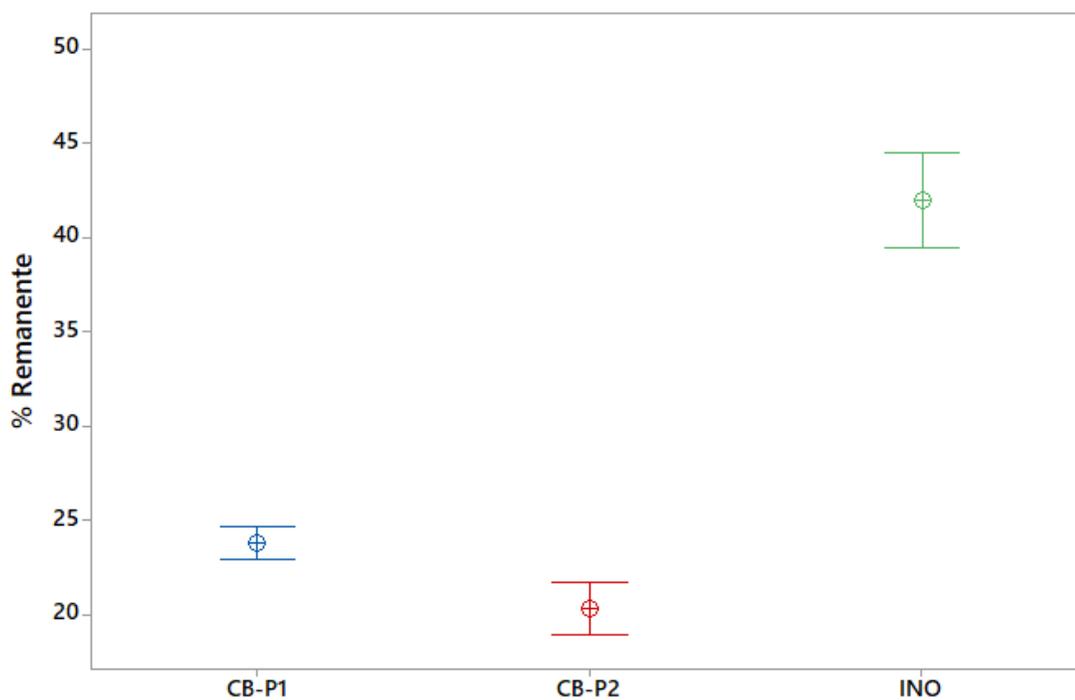


Figura 4.8 Porcentaje remanente para cada compuesto.

4.4 RECUPERACIÓN QUÍMICA

El método de la recuperación vía química es el resultado del uso de diferentes aditivos que puedan neutralizar o acidificar la arena recubierta con silicato de sodio.

En este trabajo fueron utilizados distintos ácidos como aditivos que ayudan a neutralizar la arena altamente alcalina debido a la presencia de silicato de sodio sobre los granos. En total fueron utilizados 4 tipos de ácidos orgánicos y 4 tipos de ácidos inorgánicos. Los porcentajes de los ácidos sobre la arena fueron de 0.1, 0.3 y 0.5%, mientras que la arena usada es una mezcla al 25/75, 50/50 y 75/25 de arena de proceso (AP) y arena recubierta con silicato de sodio (ARSS).

Aquellas concentraciones de ácido sobre las tres mezclas de arena que bajen su pH entre 7 y 9, se toman como referencia para la elaboración de probetas para las pruebas de resistencia mecánica y vida de banco por el proceso de caja fría. Si no hubo ninguna concentración de ácido sobre alguna de las tres mezclas de arena que bajara el pH, no se realiza la prueba. Si hubo una cantidad intermedia de ácido en las mezclas de arena entre 0.1, 0.3 o 0.5% que lograra mantener el pH entre 7 y 9, según la interpolación de la gráfica, se toma ese porcentaje aunque no sean esos tres valores.

En la Tabla 4.5 y la Figura 4.9 se presentan los resultados de pH promedio para la mezcla de arenas recubierta con silicato de sodio (ARSS) y arena de proceso (AP) para 0.1, 0.3 y 0.5% de aditivos ácidos.

Tabla 4.5 pH para diferentes porcentajes de arena con silicato (ARSS) con diferentes porcentajes de ácidos.

	% ARSS / AP	75/25			50/50			25/75		
	% de ácido	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5
Tipo de ácido y pH promedio	AC	11.8	11.7	11.4	11.7	11.3	10.2	11.3	7.5	5.0
	AA	11.8	11.0	5.4	11.4	6.5	4.8	10.7	4.8	4.4
	AL	11.9	11.7	11.4	11.7	11.2	10.0	11.2	5.5	4.1
	AF	11.7	10.7	4.3	11.4	4.9	3.7	10.5	3.7	3.4
	HCl	11.8	11.5	11.2	11.6	11.0	8.1	11.0	5.5	3.1
	H ₂ SO ₄	11.6	10.0	2.8	11.3	3.2	2.4	8.0	2.6	2.2
	HNO ₃	10.9	10.6	10.3	10.7	10.3	5.5	10.5	4.3	2.8
	H ₃ PO ₄	10.9	9.4	7.2	10.5	7.4	6.1	9.1	5.5	3.0

Nomenclatura: ARSS = Arena recubierta con silicato, AP = Arena de proceso; AC = Ac. Cítrico, AA = Ac. Acético, AL = Ac. Láctico, AF = Ac. Fórmico

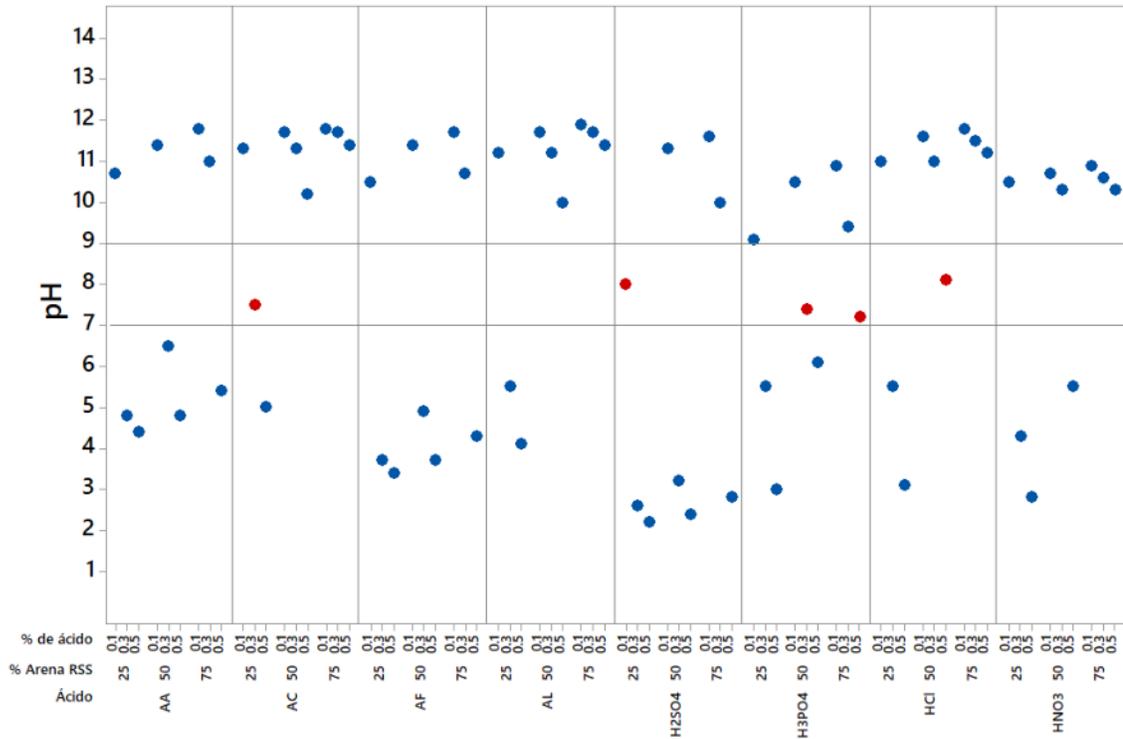


Figura 4.9 pH para diferentes porcentajes de arena con silicato (ARSS) con diferentes porcentajes de ácidos

Una vez obtenidos los datos de pH para cada ácido y cada porcentaje de arena RSS, se toman todos los valores que caen entre 7 y 9 y se toma el porcentaje de aditivo ácido que se usará para las pruebas de elaboración de probetas por caja fría. La Tabla 4.6 muestra los valores de porcentaje de ácidos que hay que agregar para cada condición en donde los valores de pH caen en el rango de 7 a 9.

Tabla 4.6 Porcentaje de ácido a usar de cada ácido para la fabricación de probetas de caja fría

Ácido	% de resina	ARSS / AP	% ácido
AC	1.0	75/25	---
		50/50	---
		25/75	0.3
AA	1.0	75/25	0.4
		50/50	0.25
		25/75	0.15
AL	1.0	75/25	---
		50/50	---
		25/75	0.25
AF	1.0	75/25	0.4
		50/50	0.25
		25/75	0.2
HCl	1.0	75/25	---
		50/50	0.5
		25/75	0.2
H ₂ SO ₄	1.0	75/25	0.35
		50/50	0.25
		25/75	0.1
HNO ₃	1.0	75/25	---
		50/50	0.4
		25/75	0.25
H ₃ PO ₄	1.0	75/25	0.35
		50/50	0.3
		25/75	0.15
Testigo	1.0	75/25	---
		50/50	---
		25/75	---
		0/100	---

Nomenclatura: ARSS: Arena recubierta con silicato de sodio, AP = Arena de proceso; AC = Ac. Cítrico, AA = Ac. Acético, AL = Ac. Láctico, AF = Ac. Fórmico.

4.4.1 Desarrollo de resistencia y vida de banco

Para evaluar el comportamiento de los corazones en función del tiempo después de haber sido fabricados, se utiliza el desarrollo de resistencia mecánica. La vida de banco indica el tiempo de vida útil de la mezcla; es decir, el tiempo durante el cual una mezcla fabricada deberá mantener sus propiedades. De tal manera que en el momento de ser utilizada se asegure la resistencia de los corazones.

La Figura 4.10 muestra el desarrollo de resistencia inmediato (0.0 h) y de resistencia a 0.5 y 1.0 horas para la mezcla con 25% de arena recubierta con silicato (ARSS). Los porcentajes de aditivos ácidos para un 25% se mencionan en la Tabla 4.5. Además, se realizó un blanco (muestra testigo) con 100% arena recuperada de proceso (AP) y una mezcla sin aditivo (S/A) pero con 25% de arena ARSS. Se establece una especificación de 0.6 MPa para el proceso fenólico-uretánico de caja fría. Este valor indica que los corazones van a resistir su manejo al ser manipulados. La Tabla 4.7 muestra los datos del análisis.

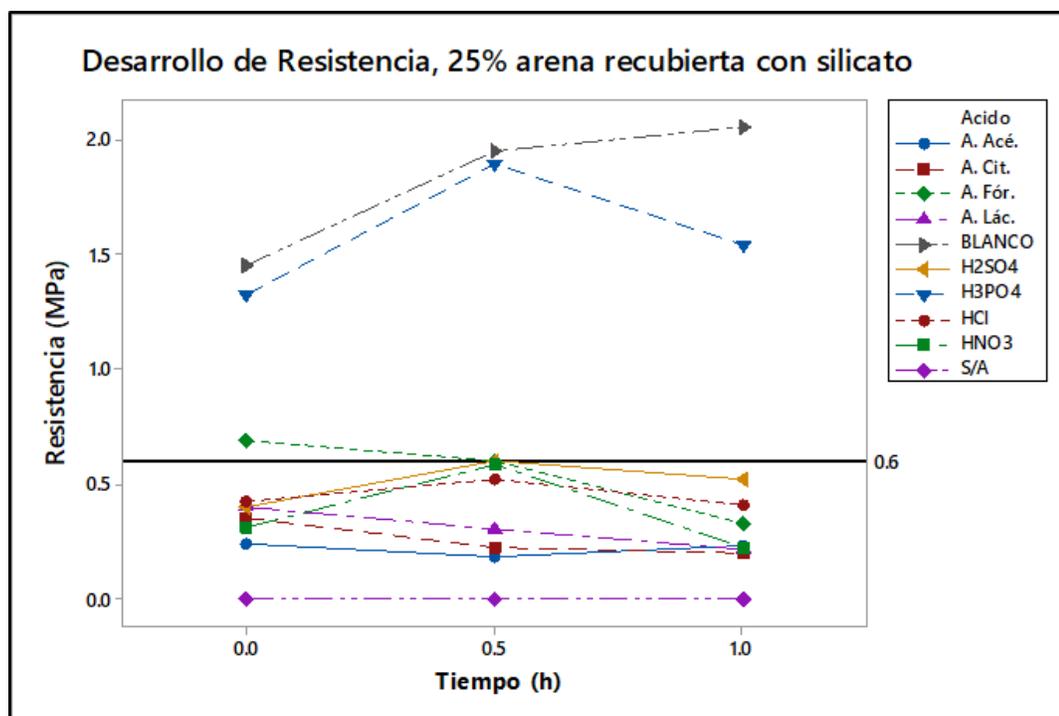


Figura 4.10 Desarrollo de resistencia mecánica usando 25% de arena ARSS.

Como se muestra en la Figura 4.9, solo un ácido fue capaz de alcanzar la especificación mínima de 0.6 MPa para todas las condiciones, que fue el ácido fosfórico H_3PO_4 . El ácido fórmico presentó buena resistencia inmediata, sin embargo, el desarrollo de resistencia cae por debajo de la especificación. El blanco o testigo, es decir, 100% de arena de proceso, alcanzó hasta 2.0 MPa a la media hora. Además, se observa que la muestra con 25% de arena ARSS y sin aditivo, presenta una resistencia de 0.0 MPa, esto quiere decir que no hubo curado del corazón al momento de su fabricación. El ácido acético fue el que tuvo más bajo desempeño de todos.

Tabla 4.7 Desarrollo de resistencia mecánica usando 25% de arena ARSS.

Desarrollo de resistencia (MPa), 25% ARSS			
Ácido	0.0 h	0.5 h	1.0 h
A. Acé.	0.24	0.18	0.23
A. Cit.	0.35	0.22	0.20
A. Fór.	0.69	0.60	0.33
A. Lác.	0.40	0.30	0.21
BLANCO	1.45	1.95	2.05
H ₂ SO ₄	0.40	0.60	0.52
H ₃ PO ₄	1.32	1.89	1.54
HCl	0.42	0.52	0.41
HNO ₃	0.31	0.58	0.22
S/A	0.00	0.00	0.00

La Figura 4.11 y la Tabla 4.8 presentan la vida de banco a 0.5 y 1.0 h para la mezcla con 25% de arena recubierta con silicato (ARSS). Al igual que en el desarrollo de resistencia, el ácido fórmico y el ácido fosfórico fueron los que mostraron mejor desempeño, especialmente este último. Al igual que en desarrollo de resistencia, la muestra con 25% de arena RSS y sin aditivo, presenta una resistencia de 0.0 MPa y el ácido acético fue el aditivo con más baja resistencia.

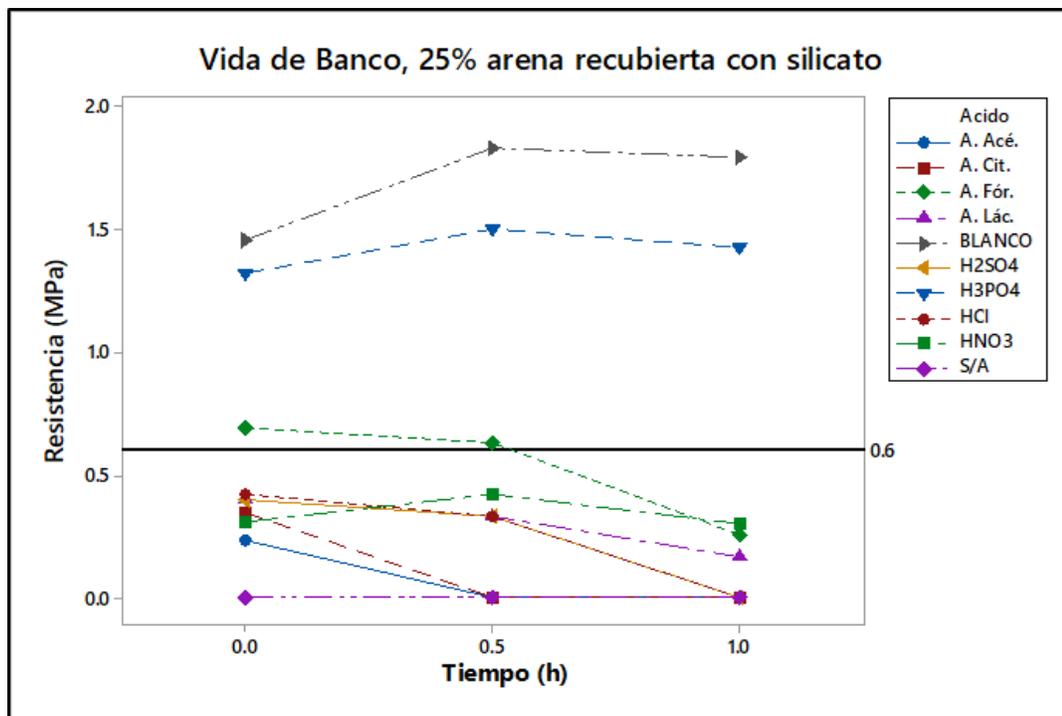


Figura 4.11 Vida de banco usando 25% de arena ARSS.

Tabla 4.8 Vida de banco usando 25% de arena ARSS.

Vida de banco (MPa), 25% ARSS			
Ácido	0.0 h	0.5 h	1.0 h
A. Acé.	0.24	0.00	0.00
A. Cit.	0.35	0.00	0.00
A. Fór.	0.69	0.63	0.26
A. Lác.	0.40	0.33	0.17
BLANCO	1.45	1.83	1.79
H2SO4	0.40	0.33	0.00
H3PO4	1.32	1.50	1.42
HCl	0.42	0.33	0.00
HNO3	0.31	0.42	0.30
S/A	0.00	0.00	0.00

En cuanto al desarrollo inmediato y de resistencia a 0.5 y 1.0 horas para la mezcla con 50% de arena recubierta con silicato, muchos aditivos ya no son capaces de neutralizar completamente la arena y ya no hay curado de los corazones. Por otra parte, las muestras que fueron neutralizadas utilizando ácido fosfórico (H_3PO_4) muestran altas propiedades tanto inmediatas como en desarrollo, siendo el único aditivo capaz de curar corazones usando 50% de arena ARSS, mientras que aquellas neutralizadas con ácido fórmico y ácido acético presentan resistencia inmediata altas pero bajas resistencias en desarrollo. El resto de los aditivos no fueron capaces de formar corazones debido a la mayor presencia de silicato en la arena. La Figura 4.12 y la Tabla 4.9 muestran la gráfica de resistencia inmediata y el desarrollo de resistencia para la mezcla con 50% de arena recubierta con silicato.

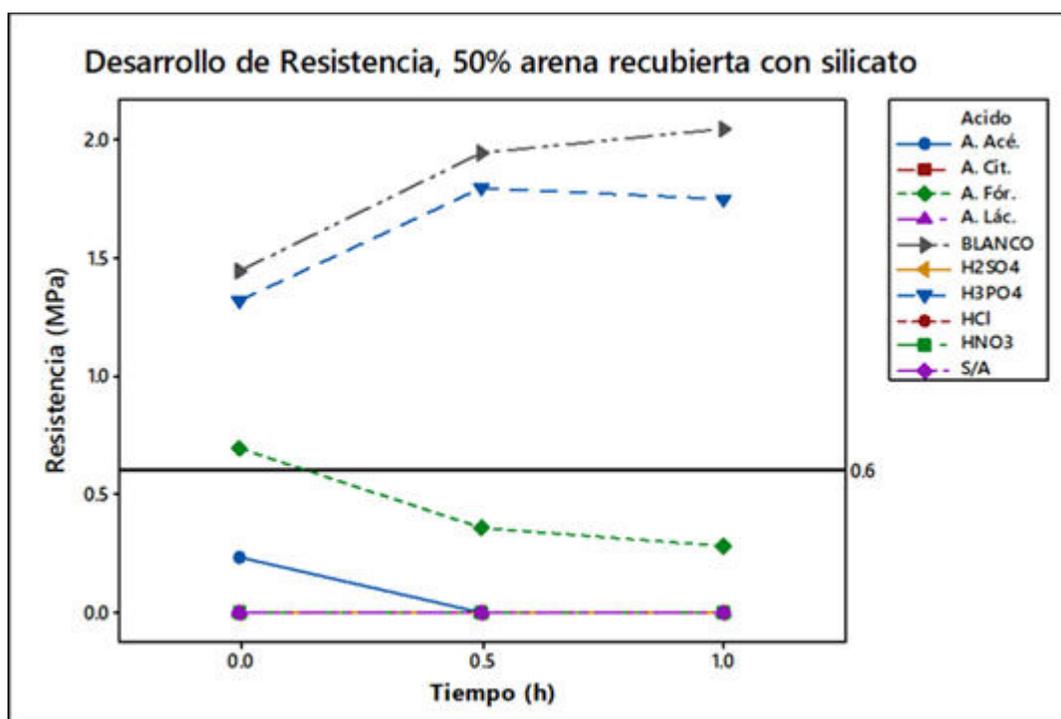


Figura 4.12 Desarrollo de resistencia usando 50% de arena RSS.

Tabla 4.9 Desarrollo de resistencia usando 50% de arena ARSS.

Desarrollo de resistencia (MPa), 50% ARSS			
Ácido	0.0 h	0.5 h	1.0 h
A. Acé.	0.24	0.00	0.00
A. Cit.	0.00	0.00	0.00
A. Fór.	0.70	0.36	0.28
A. Lác.	0.00	0.00	0.00
BLANCO	1.45	1.95	2.05
H ₂ SO ₄	0.00	0.00	0.00
H ₃ PO ₄	1.32	1.80	1.75
HCl	0.00	0.00	0.00
HNO ₃	0.00	0.00	0.00
S/A	0.00	0.00	0.00

Para la vida de banco usando la mezcla de arena con 50% de arena recubierta con silicato de sodio, se muestra un resultado similar al desarrollo de resistencia, en donde utilizando el ácido fosfórico, las muestras presentan mejores propiedades mecánicas a la media hora y una hora, por lo que se comprueba como el aditivo ácido óptimo para las mezclas con hasta un 50% de arena con silicato. El resto de los aditivos se mantienen igual como en el desarrollo de resistencia. La Figura 4.13 y la Tabla 4.10 muestran la gráfica de vida de banco para la mezcla con 50% de arena recubierta con silicato.

Las Figuras 4.14 y 4.15, así como las Tablas 4.11 y 4.12 muestran las gráficas de resistencia inmediata y el desarrollo de resistencia, y de vida de banco para las mezclas con 75% de arena con silicato. Como se observa en ambas gráficas, en ningún caso el efecto de los aditivos ácidos funcionan para el curado de los corazones por el proceso de caja fría. La muestra neutralizada con ácido fosfórico no presenta resistencia mecánica ni vida de banco similares a las mezclas de 25 y 50% de arena recubierta con silicato.

En ninguno de los casos, la fluidez de la mezcla de arena y resina se ve perjudicada al adicionar los ácidos.

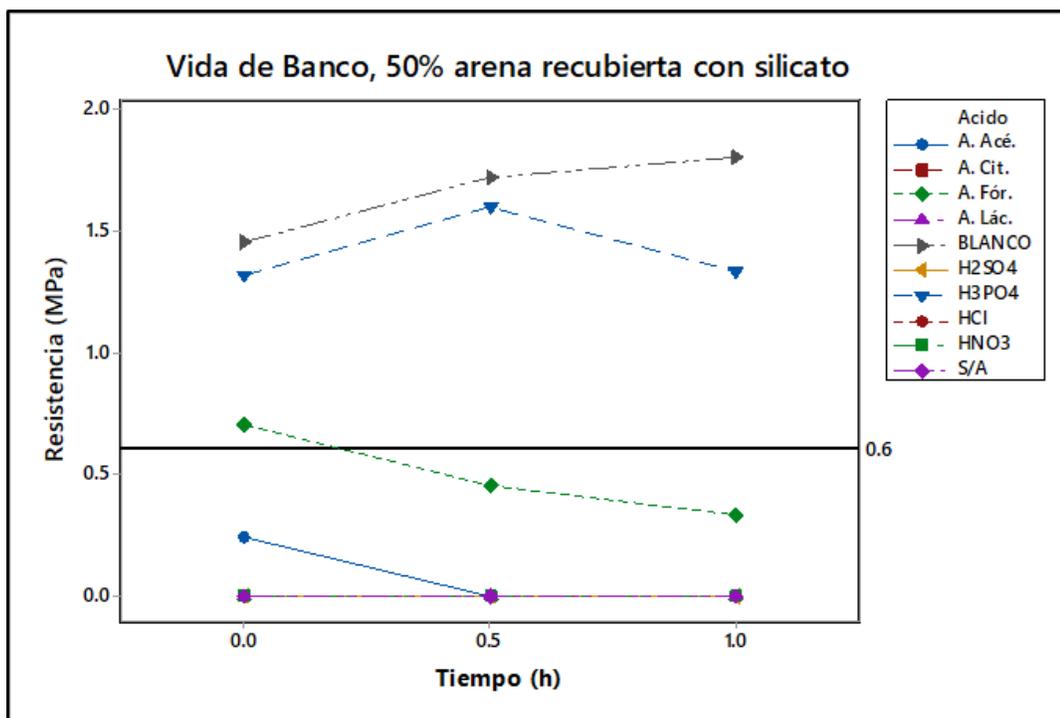


Figura 4.13 Vida de banco usando 50% de arena RSS.

Tabla 4.10 Vida de banco usando 50% de arena ARSS.

Vida de banco (MPa), 50% ARSS			
Ácido	0.0 h	0.5 h	1.0 h
A. Acé.	0.24	0.00	0.00
A. Cit.	0.00	0.00	0.00
A. Fór.	0.70	0.45	0.33
A. Lác.	0.00	0.00	0.00
BLANCO	1.45	1.72	1.80
H2SO4	0.00	0.00	0.00
H3PO4	1.32	1.60	1.33
HCl	0.00	0.00	0.00
HNO3	0.00	0.00	0.00
S/A	0.00	0.00	0.00

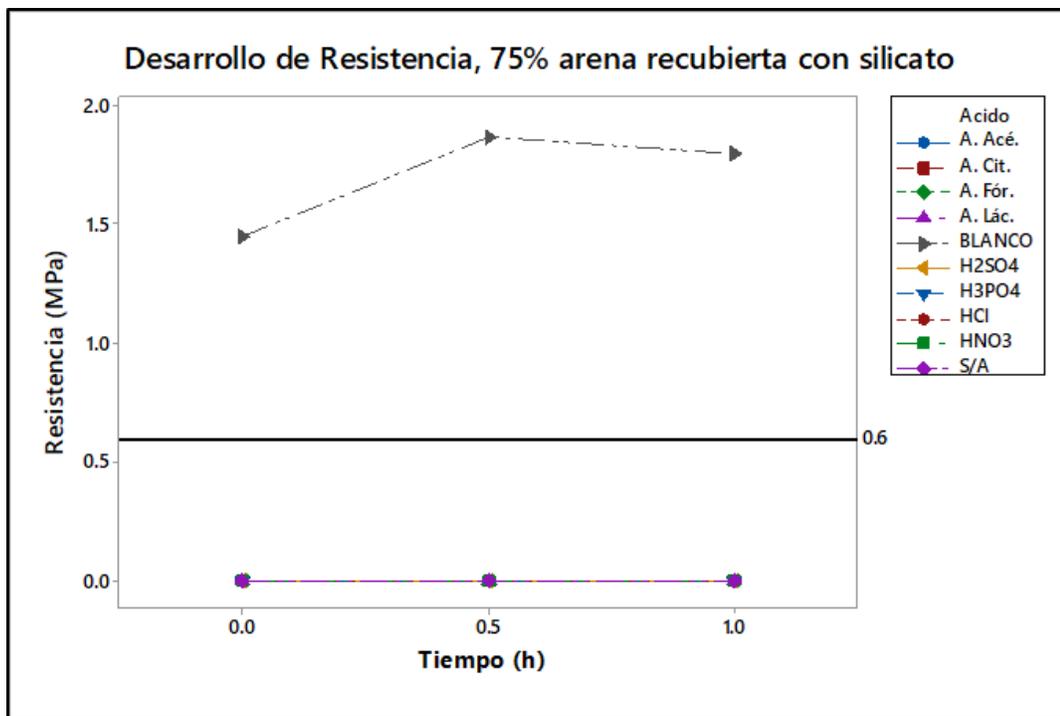


Figura 4.14 Desarrollo de resistencia usando 75% de arena RSS.

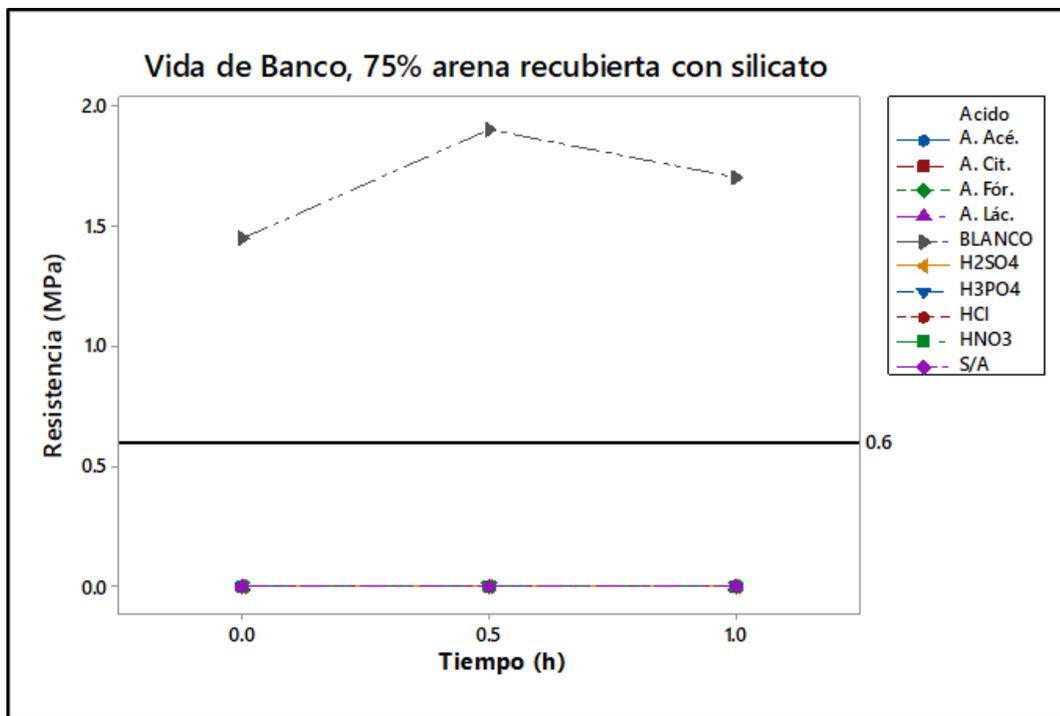


Figura 4.15 Vida de banco usando 75% de arena RSS.

Tabla 4.11 Desarrollo de resistencia usando 75% de arena ARSS.

Desarrollo de resistencia (MPa), 75% ARSS			
Ácido	0.0 h	0.5 h	1.0 h
A. Acé.	0.00	0.00	0.00
A. Cit.	0.00	0.00	0.00
A. Fór.	0.00	0.00	0.00
A. Lác.	0.00	0.00	0.00
BLANCO	1.45	1.87	1.80
H2SO4	0.00	0.00	0.00
H3PO4	0.00	0.00	0.00
HCl	0.00	0.00	0.00
HNO3	0.00	0.00	0.00
S/A	0.00	0.00	0.00

Tabla 4.12 Vida de banco usando 75% de arena ARSS.

Vida de banco (MPa), 75% ARSS			
Ácido	0.0 h	0.5 h	1.0 h
A. Acé.	0.00	0.00	0.00
A. Cit.	0.00	0.00	0.00
A. Fór.	0.00	0.00	0.00
A. Lác.	0.00	0.00	0.00
BLANCO	1.45	1.86	1.68
H2SO4	0.00	0.00	0.00
H3PO4	0.00	0.00	0.00
HCl	0.00	0.00	0.00
HNO3	0.00	0.00	0.00
S/A	0.00	0.00	0.00

4.5 RECUPERACIÓN MECÁNICA

El método de recuperación por vía mecánica es el resultado de atrición entre granos de arena para la eliminación de la capa externa presente en los mismos granos. Con esto se pretende eliminar o reducir la capa de silicato de sodio para la disminución del pH y así poder usar esta arena en el proceso orgánico de caja fría; el cual, como ya se ha mencionado requiere un valor de pH entre 7 y 9.

En este trabajo se ha utilizado un molino de mortero, teniendo como variables la presión ejercida por el mortero, el tiempo de atrición, el número de ciclos de atrición y el porcentaje de silicato de sodio en la arena. En esta primera etapa, el AFS, el porcentaje de finos y el pH fueron las variables de respuesta.

La presión de trabajo ejercida por el mortero varió de 1 a 5, las cuales son unidades estándar del molino. El tiempo de atrición fue 1 y 5 minutos, mientras que se realizaron 3 ciclos de atrición. La arena usada RSS fue de 25, 50 y 75% de arena recubierta con silicato. Posterior a cada ciclo de atrición, se fueron eliminando los finos.

Debido a que existe un proceso de molienda en esta etapa de recuperación, es importante la evaluación del AFS y el porcentaje de finos. Al haber atrición entre grano y grano, el AFS tiende a aumentar junto con los finos. El porcentaje de finos máximo es de 1.0%, de acuerdo a la referencia que se tiene, mientras que el AFS se encuentra entre 40 y 50.

Posterior a todo el proceso que involucra la atrición mecánica para reducir la capa de silicato de sodio y así disminuir el pH de la arena, se realizan propiedades mecánicas usando aquellas combinaciones que dieran un pH entre 7 y 9, con el fin de evaluar el proceso de recuperación mecánica.

La figura 4.16 muestra la formación de finos en la arena usando las 5 diferentes presiones y los 3 tipos de arenas. Todo esto después del primer ciclo de atrición. En la gráfica se aprecia claramente el aumento de porcentaje de finos al aumentar la presión del mortero. A partir de una presión de 4 en el mortero, los finos se disparan por encima de 1.0%, que es la especificación de proceso, y para un ciclo de 5 minutos, casi todos los valores se encuentran fuera de especificación.

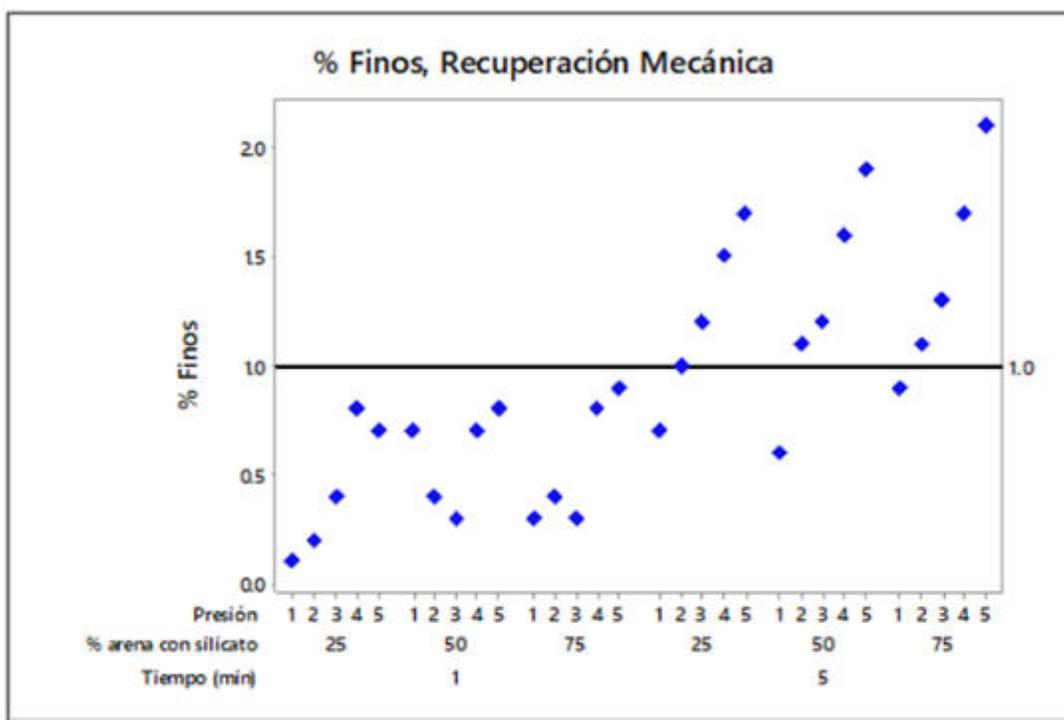


Figura 4.16 Porcentaje de finos formados a diferentes presiones y arenas.

La figura 4.17 muestra el AFS de la arena usando las 5 diferentes presiones y los 3 tipos de arenas. Al igual que para los finos, después del primer ciclo de atrición. En la gráfica se aprecia también el aumento del AFS al aumentar la presión del mortero. A partir de una presión de 4 en el mortero, el AFS sale de especificación para todos los tipos de arenas y tiempos de atrición.

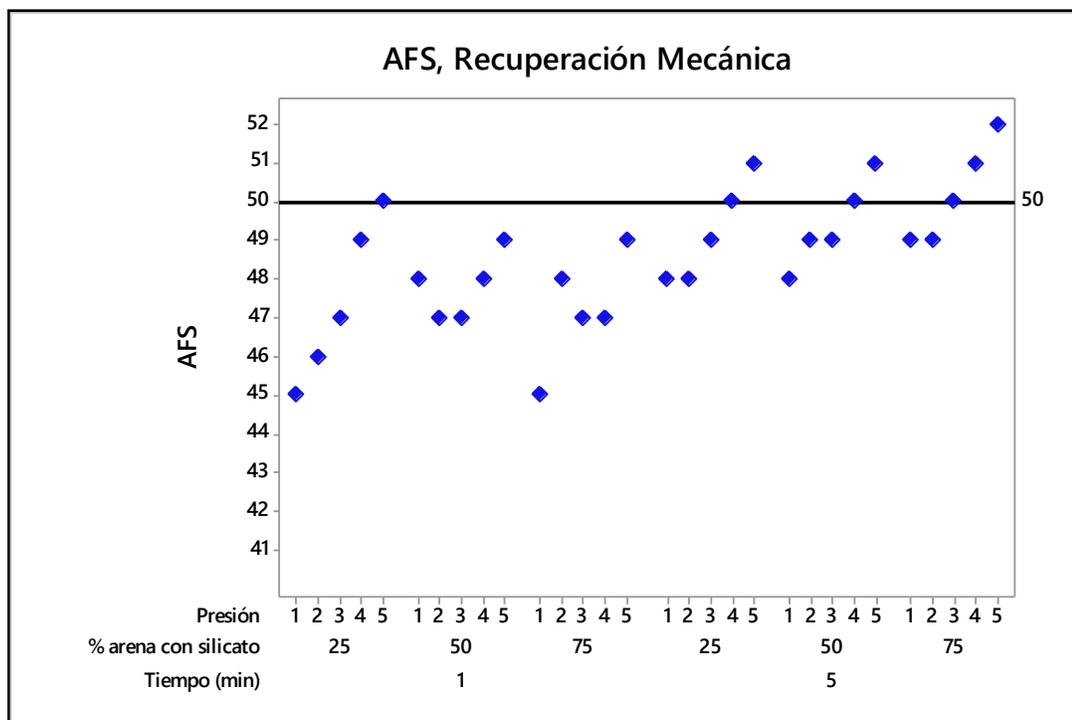


Figura 4.17 AFS de las arenas a diferentes presiones.

En la Tabla 4.13 se presentan los datos de AFS y porcentaje de finos para las diferentes presiones, tiempos de atrición y porcentajes de arena recubierta con silicato de sodio (ARSS).

Tabla 4.13 AFS y porcentaje de finos formados a diferentes presiones y arenas.

Tiempo (min)	% ARSS	Presión	AFS	% Finos
1	25	1	45	0.1
1	25	2	46	0.2
1	25	3	47	0.4
1	25	4	49	0.8
1	25	5	50	0.7
1	50	1	48	0.7
1	50	2	47	0.4
1	50	3	47	0.3
1	50	4	48	0.7
1	50	5	49	0.8
1	75	1	45	0.3
1	75	2	48	0.4
1	75	3	47	0.3
1	75	4	47	0.8
1	75	5	49	0.9
5	25	1	48	0.7
5	25	2	48	1.0
5	25	3	49	1.2
5	25	4	50	1.5
5	25	5	51	1.7
5	50	1	48	0.6
5	50	2	49	1.1
5	50	3	49	1.2
5	50	4	50	1.6
5	50	5	51	1.9
5	75	1	49	0.9
5	75	2	49	1.1
5	75	3	50	1.3
5	75	4	51	1.7
5	75	5	52	2.1

En la Tabla 4.14 se presenta el análisis de AFS y porcentaje de finos para la muestra con 5 de presión, 5 minutos y usando arena al 75%.

Tabla 4.14 Análisis de AFS y % de finos para la muestra con 5 de presión, 5 minutos y usando arena al 75%.

No.de	Total	Retenido por malla			Producto															
		Malla	Acumulado	Gramos		%	Factor													
20	0		0.00	0.00	12	0														
30	0.1		0.10	0.1	20	1														
40	32		31.90	16.82	30	505														
50	105.9		73.90	38.98	40	1559														
70	156.5		50.60	26.69	50	1334														
100	178.7		22.20	11.71	70	820														
140	185		6.30	3.32	100	332														
200	186.4		1.40	0.74	140	103														
270	187.7		1.30	0.69	200	137														
Fondo	189.6		1.90	1.00	300	301														
Total	189.6		189.60	100		5092														
<table border="1" style="margin: auto;"> <thead> <tr> <th>AFS</th> <th>% Finos</th> <th>pH</th> <th>ADV</th> <th>LOI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>51</td> <td>2.4</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						AFS	% Finos	pH	ADV	LOI	51	2.4								
AFS	% Finos	pH	ADV	LOI																
51	2.4																			

La figura 4.18 presenta los resultados de pH en función del tipo de arena, el tiempo y la presión de atrición. Como era de esperarse, las muestras con 25% de arena recubierta con silicato muestran menor pH que con las de 50 y 75%. Se observa que ni la presión, ni el tiempo de atrición mecánica, influyeron en el cambio de pH, a pesar de que los finos fueron removidos en las muestras de arena para cada condición.

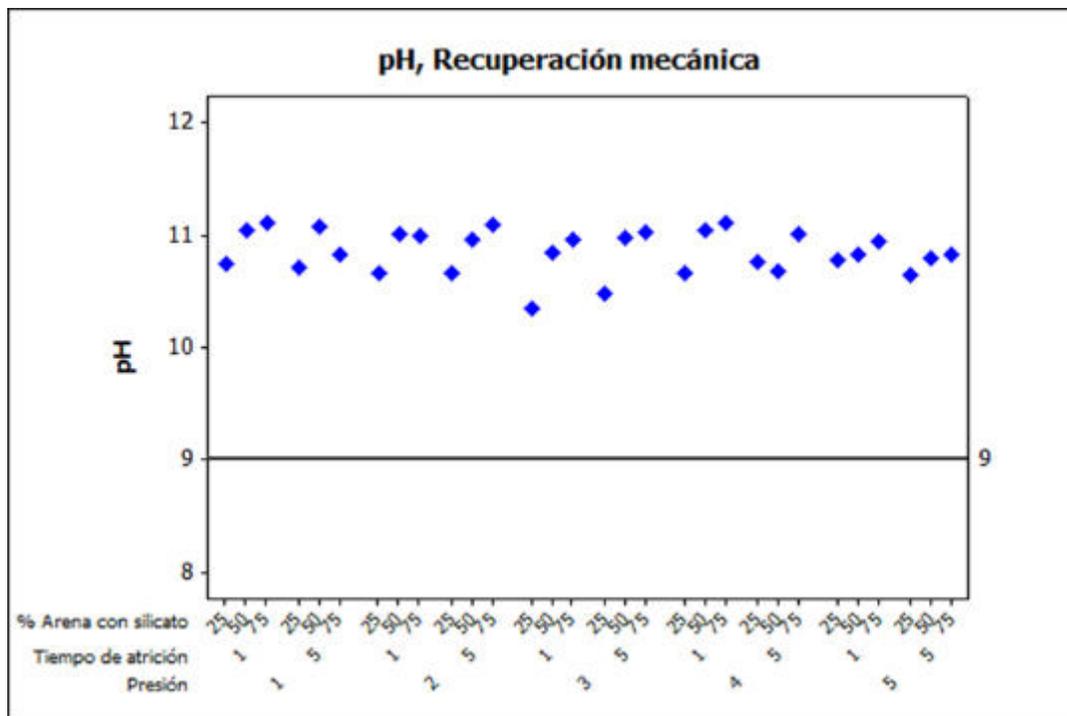


Figura 4.18 pH de la arena atricionada mecánicamente.

4.5.1 Desarrollo de resistencia y vida de banco

Se observa que la atrición mecánica arroja altos valores de pH, por lo cual, debido al alto pH en las arenas, el desarrollo de resistencia y vida de banco para probetas por el proceso de caja fría no fue exitoso, al no obtener ni una sola probeta al momento de fabricarlas y curarlas con la amina.

4.6 RECUPERACIÓN ACUOSA

El lavado de las arenas es un proceso de recuperación de las arenas con el fin de eliminar contaminantes presentes. Este lavado puede ser llevado a cabo con simplemente agua o con una solución ácida diluida. Posterior al lavado, se puede llevar a cabo la etapa de enjuague para eliminar la presencia de ácido residual o remanentes de finos o lodos. Una vez realizado el lavado y enjuague, se procede a analizar el pH de la arena, el cual el valor óptimo es entre 7 y 9 para obtener corazones.

Como se mencionó en el capítulo 3 de metodología experimental, en este proyecto se trabajó con distintos tiempos de lavado y con dos ciclos de enjuague de 10 minutos cada uno, usando tres distintos tipos de métodos:

- a) Agua fría (25°C): el silicato de sodio es soluble en agua, por lo que el lavado con agua a temperatura ambiente es viable.
- b) Agua caliente (en ebullición): a mayor temperatura, mayor solubilidad, por lo que la eliminación del silicato de sodio en la arena es más viable y con mejora en productividad. El agua se calentó hasta ebullición y de ahí se usó inmediatamente para el lavado. Los ciclos de enjuague fueron usando agua a temperatura ambiente.
- c) Solución de HCl 0.5N: el ácido clorhídrico reacciona con el sodio presente del silicato, formando sales de sodio y así, neutralizando el pH de la arena.

Los tiempos de lavado (o agitación) fueron de 15, 30 y 45 minutos. Se realizaron 3 ciclos totales de recuperación acuosa: uno de lavado y dos de enjuague con agua potable. Los ciclos de lavado fueron de 10 minutos cada uno. Además, se usaron 3 tipos de arenas recubiertas con silicato (ARSS): 25, 50 y 75%, como en el resto de los procesos de recuperación.

Se midió el pH para cada condición y cada arena, así como también el pH de la arena en cada uno de los tres ciclos involucrados en el proceso de recuperación acuosa. La Tabla 4.15 muestra los datos de pH obtenidos por tipo de lavado, tiempo y % de ARSS, así como en las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21.

Tabla 4.15 Resultados de pH por condición de lavado, % de arena recubierta con silicato de sodio (ARSS) y tiempo de lavado.

CONDICIÓN	% ARSS	LAVADO		ENJUAGUE	
		1ER CICLO		2DO CICLO	3ER CICLO
		TIEMPO	pH	pH	pH
AGUA FRÍA	75%	15	10.50	9.75	8.60
		30	10.42	9.35	8.51
		45	10.37	9.23	8.50
	50%	15	10.40	9.00	8.41
		30	10.30	8.83	8.33
		45	10.19	8.60	8.29
	25%	15	10.15	8.62	8.18
		30	10.09	8.68	8.30
		45	10.08	8.77	8.40
AGUA CALIENTE	75%	15	10.26	9.04	8.51
		30	10.34	9.06	8.49
		45	10.25	8.98	8.44
	50%	15	10.10	8.74	8.39
		30	10.15	8.79	8.38
		45	10.06	8.66	8.29
	25%	15	9.80	8.82	8.26
		30	9.80	8.68	8.26
		45	9.78	8.47	8.24
AGUA HCl 0.5N	75%	15	1.06	2.03	5.83
		30	0.97	2.21	7.44
		45	0.78	2.27	7.60
	50%	15	0.86	2.19	6.83
		30	0.78	2.12	7.65
		45	0.76	2.14	7.71
	25%	15	0.67	2.22	7.83
		30	0.69	2.13	7.86
		45	0.73	2.50	7.98

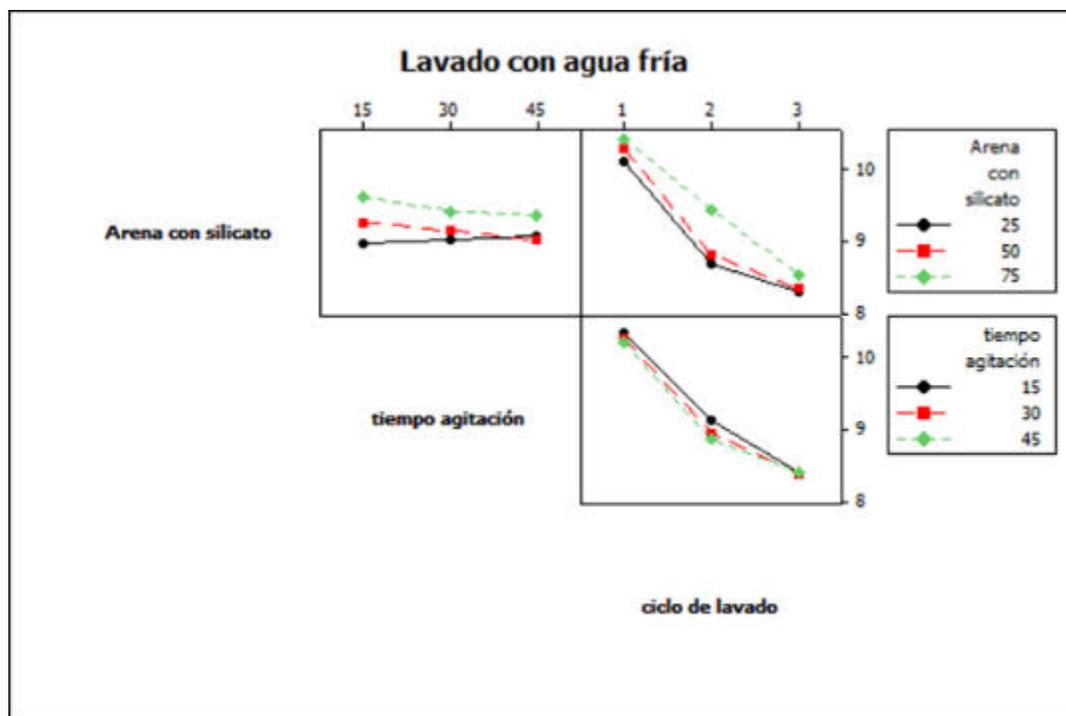


Figura 4.19 Resultados de pH a diferentes tipos de ARSS, tiempos de agitación y ciclos de lavado con agua fría.

La Figura 4.19 muestra los resultados de pH a diferentes tipos de a ARSS, tiempos de agitación y ciclos de lavado con agua fría.

Para un porcentaje de 25% de arena ARSS hay mejores resultados que con 50 y 75%, ya que el pH está por debajo de 9 para los tres tiempos de agitación. En cuanto a los ciclos de lavado, para el tercer ciclo (un lavado y dos enjuagues) se muestra el descenso de hasta un pH de 8.2 con dos ciclos (un lavado y un enjuague), el pH varía entre 9.4 y 8.8, dependiendo de la cantidad de arena RSS. Como se muestra en las gráficas, un ciclo (solamente el lavado) no es suficiente como para disminuir el pH de la arena recubierta con silicato de sodio. En cuanto a los tiempos de agitación se observa que, para el lavado con agua fría, el tiempo no influye en bajar más el pH, inclusive usando diferentes arenas RSS y diferentes ciclos.

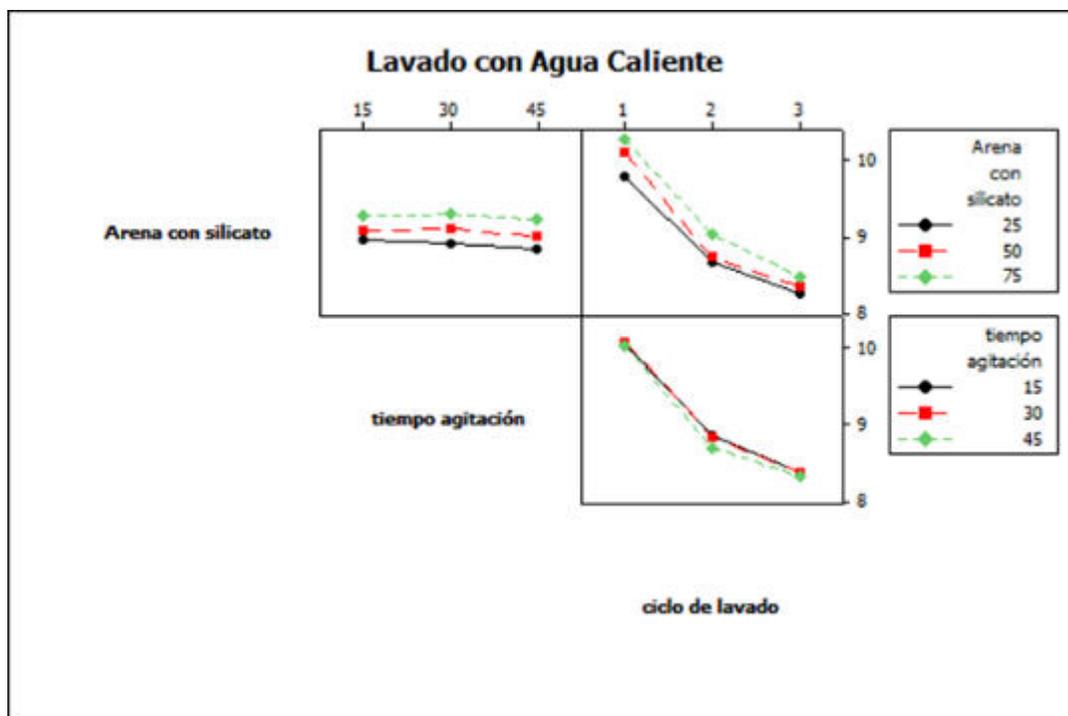


Figura 4.20 Resultados de pH a diferentes tipos de ARSS, tiempos de agitación y ciclos de lavado con agua caliente.

La figura 4.20 muestra los resultados de pH a diferentes tipos de ARSS, tiempos de agitación y ciclos de lavado con agua caliente.

Igual que para el lavado con agua fría, para un porcentaje de 25% de arena RSS hay mejores resultados que con 50 y 75%, ya que el pH está por debajo también de 9 para los tres tiempos de agitación. En cuanto a los ciclos de lavado, para el tercer ciclo, se muestra el descenso de hasta un pH de 8.1 y con dos ciclos, el pH varía entre 9.0 y 8.5, dependiendo de la cantidad de arena RSS. Con este tipo de agua, solo se requiere 2 ciclos (un lavado y un enjuague) para bajar el pH de 9. Al igual que con agua fría, un ciclo (solamente el lavado) no es suficiente como para disminuir el pH de la ARSS. En cuanto a los tiempos de agitación se observa que, para el lavado con agua caliente, el tiempo prácticamente no influye en bajar el pH, inclusive usando diferentes arenas RSS y diferentes ciclos.

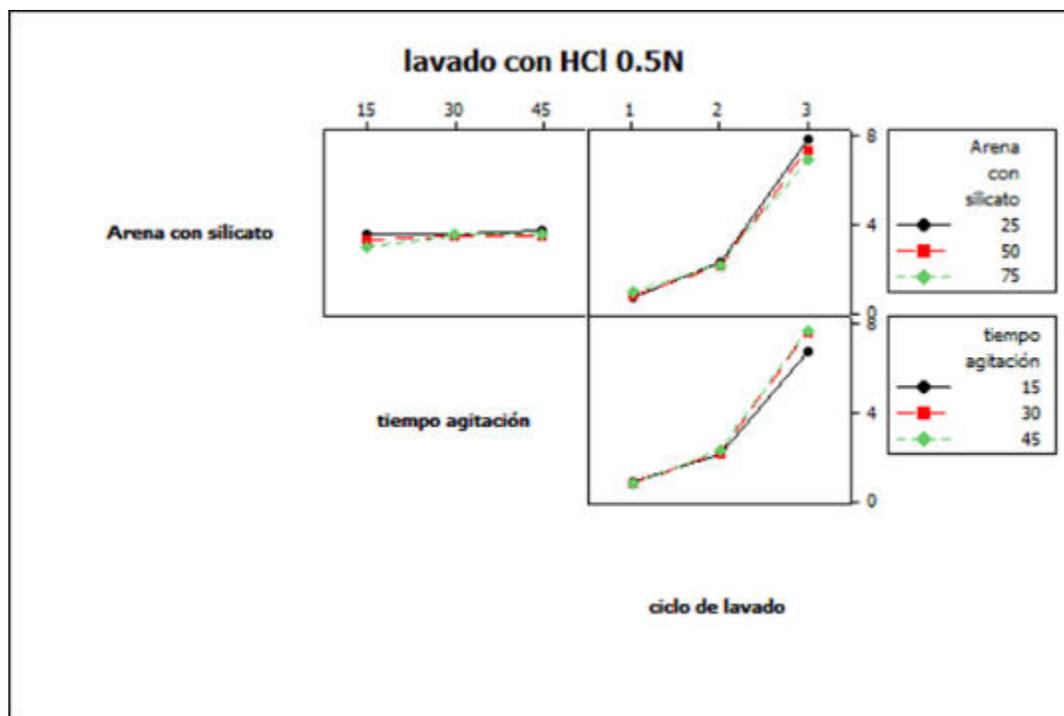


Figura 4.21 Resultados de pH a diferentes tipos de ARSS, tiempos de agitación y ciclos de lavado con HCl.

La figura 4.21 muestra los resultados de pH a diferentes tipos de ARSS, tiempos de agitación y ciclos de lavado con HCl 0.5 N.

En este tipo de lavado con una solución ácida, al analizar el pH de la arena, se obtiene un pH entre 1 y 2 debido al ácido que se está usando, por lo que da más importancia el tratar la arena con uno o más enjuagues. Este enjuague eliminará los remanentes de ácido que vayan a quedar del lavado, por lo que es de importancia esta parte del proceso. Al igual que con el lavado del agua fría y agua caliente, se contemplaron tres ciclos, uno de lavado y dos de enjuague, usando los mismos tiempos de proceso.

Para los tres diferentes tipos de arena recubierta con silicato de sodio (ARSS): 25, 50 y 75%, no hay ninguna diferencia en cambio de pH, por lo que con cualquier condición de tiempos y ciclos de lavado es lo mismo, obteniendo

valores bajos de pH menores a 2 para uno y dos ciclos, y un valor de 7.5 para el tercer ciclo. Al igual que con los otros dos métodos de lavado, los tiempos entre 15, 30 y 45 minutos no representan un factor para tener el nivel de pH óptimo.

4.6.1 Desarrollo de resistencia y vida de banco

Una vez obtenido los resultados de pH para los diversos métodos de lavado en el proceso de recuperación acuoso, se procedió a lavar arena recubierta con silicato de sodio para fabricar probetas por el proceso de caja fría para evaluar su desarrollo de resistencia y vida de banco. Como se reportó en los resultados de la Tabla 4.15, no hay diferencia significativa en los valores de pH con ARSS al 25, 50 y 75%. Debido a esto, se realizaron probetas de caja fría únicamente con 75% de ARSS.

La figura 4.22 indica el desarrollo de resistencia usando diferentes condiciones de lavado. Como ya se mencionó, se realizaron solo las pruebas de desarrollo de resistencia y vida de banco para 75% de ARSS. Se observa que las muestras preparadas bajo las siguientes condiciones de lavado: agua caliente, agua fría y la solución de HCl tienen resistencia por encima de la referencia de 0.6 MPa, tanto para resistencia inmediata como para 0.5 y 1.0 horas. Los resultados de resistencia usando agua fría y caliente se muestran muy parecidos, mientras que cuando se utilizó la solución ácida la resistencia es menor, probablemente debido a los residuales de ácido que quedaron en la arena y reaccionaron con las resinas de caja fría. El blanco o testigo (100% arena de proceso) mostró los mejores resultados de resistencia, apenas por encima de las tres condiciones de lavado. La Tabla 4.16 muestra los datos para esta misma condición.

Tabla 4.16 Resultados de desarrollo de resistencia a diferentes condiciones de lavado, usando 75% de arena recubierta con silicato de sodio.

Condición	Desarrollo de resistencia (horas)		
	0.0	0.5	1.0
Blanco	1.43	1.82	1.88
Agua Caliente	1.32	1.71	1.75
Agua Fría	1.38	1.68	1.70
HCl 0.5N	1.14	1.49	1.52

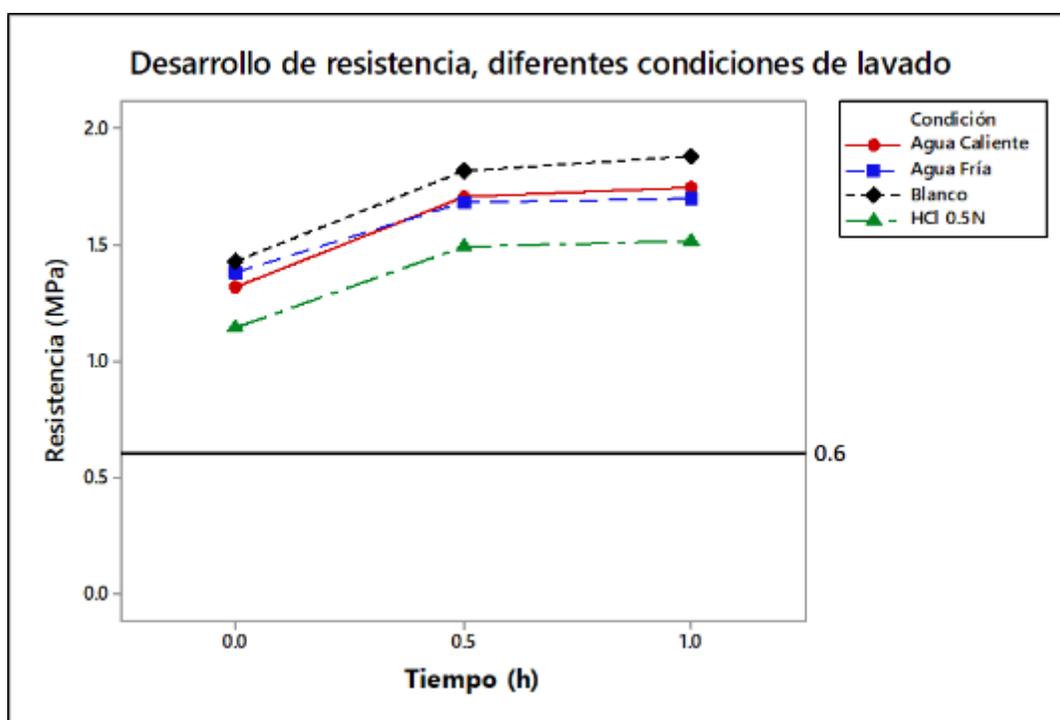


Figura 4.22 Desarrollo de resistencia a diferentes condiciones de lavado, usando 75% de arena recubierta con silicato de sodio.

En cuanto a la vida de banco (Figura 4.23 y Tabla 4.17), las muestras que siguen mostrando resistencias a la tensión significativamente similares son las tratadas bajo las condiciones de agua caliente y fría, mientras que aquellas lavadas con la solución HCl 0.5N los resultados de vida de banco fueron

menores, obteniendo valores de resistencias por encima de la referencia para una hora de vida de banco. El blanco siguió mostrando los mejores resultados, aunque dando resistencias similares a la hora de vida de banco.

Tabla 4.17 Resultados de vida de banco a diferentes condiciones de lavado, usando 75% de arena recubierta con silicato de sodio.

Condición	Vida de banco (horas)		
	0.0	0.5	1.0
Blanco	1.43	1.20	1.10
Agua Caliente	1.32	1.08	1.02
Agua Fría	1.38	1.01	1.07
HCl 0.5N	1.14	0.82	0.70

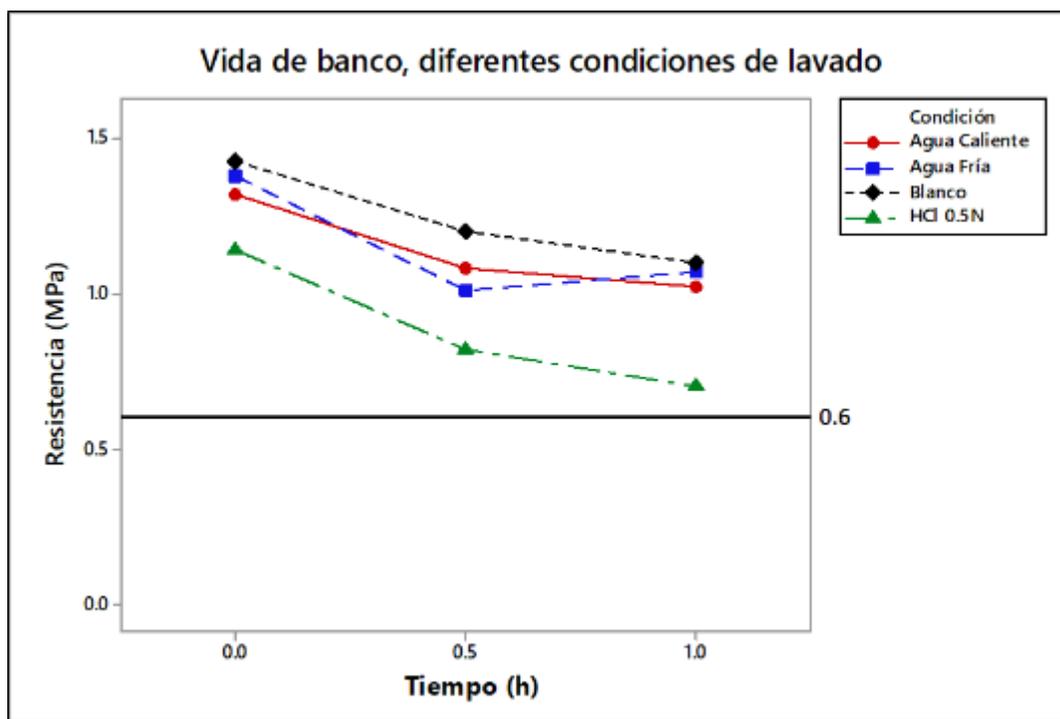


Figura 4.23 Vida de banco a diferentes condiciones de lavado, usando 75% de arena recubierta con silicato de sodio.

4.7 ENSAYOS MECÁNICOS

Una vez realizados los experimentos para la recuperación de la arena inorgánica por los métodos químico, mecánico y acuoso, se procedió a hacer el análisis completo de los ensayos mecánicos como lo son: desarrollo inmediato, desarrollo de resistencia hasta 24 horas a una humedad relativa del 30%, desarrollo de resistencia hasta 24 horas a una humedad relativa del 90% y distorsión en caliente.

Todos estos análisis se hicieron comparando un blanco o testigo con 100% de arena de proceso (AP) y una referencia con aglutinante inorgánico. Estas últimas referencias indican si el comportamiento de la arena del proceso inorgánico recuperada (AIR) está más próximo al blanco con arena de proceso o a la referencia con aglutinante inorgánico, ya que el comportamiento del proceso inorgánico es muy diferente cuando se tienen altas humedades ambientales, al igual que la resistencia térmica en el ensayo de distorsión en caliente.

La Tabla 4.18 compara los resultados de pH y propiedades mecánicas de todos los métodos de recuperación usados, así como las diferentes condiciones usadas en cada método. Se observa que solo el método de recuperación acuoso usando agua fría, agua caliente y HCl 0.5N, con los tres ciclos de lavado para cada caso, cumplen con los estándares de pH, desarrollo de resistencia y vida de banco para la arena RSS al 25, 50 y 75%.

Tabla 4.18 Comparativo de resultados de pH y propiedades mecánicas de las probetas tratadas por recuperación química, mecánica y acuosa a diferentes condiciones

Condiciones	Método	pH			Desarrollo de resistencia			Vida de banco		
		25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
Tipo de ácidos	QUÍMICO									
	A. Cítrico	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	A. Acético	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	A. Láctico	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	A. Fórmico	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	A. Clorhídrico	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	A. Sulfúrico	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	A. Nítrico	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Presión - tiempo	MECÁNICO									
	P1-1 min	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	P1-2 min	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	P1-3 min	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	P1-4 min	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	P1-5 min	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	P5-1 min	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	P5-2 min	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	P5-3 min	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
P5-4 min	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
P5-5 min	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
Método de lavado - # ciclos	ACUOSO									
	Agua fría 1 ciclo	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Agua fría 2 ciclos	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Agua fría 3 ciclos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Agua caliente 1 ciclo	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Agua caliente 2 ciclos	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Agua caliente 3 ciclos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	HCl 0.5N 1 ciclo	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
HCl 0.5N 2 ciclos	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
HCl 0.5N 3 ciclos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

Al obtener los resultados óptimos con los tres métodos de lavado, se procedió a analizar el comportamiento mecánico para las muestras tratadas mediante el método de lavado con agua fría, ya que el uso de agua caliente y el de la solución ácida HCl 0.5 N, implican un proceso más costoso al usar más energía para calentar y de mayor riesgoso en cuanto a seguridad por el uso de ácidos.

4.7.1 Desarrollo de resistencia a 0.0, 2.0 y 24.0 h a condiciones de baja y alta humedad relativa

Los ensayos de resistencia mecánica a la tensión fueron realizados tanto como a condiciones de laboratorio: 30% de humedad relativa y 21°C, así como a condiciones de alta humedad: 90% de humedad relativa y 25°C. El silicato de sodio, aglutinante para el proceso inorgánico, es altamente higroscópico, por lo que los corazones de este tipo tienden a absorber humedad del ambiente y a tener muy bajas propiedades mecánicas en desarrollo. Debido a esto, es importante comparar las propiedades mecánicas de las probetas usando también aglutinante inorgánico.

La Tabla 4.19 muestra los tipos de arena y de resina o aglutinante usado, así como el porcentaje de cada material usado.

Tabla 4.19 Tipos de pruebas y sus porcentajes de arena y resina/aglutinante

Prueba	Arena	Relacion de arenas	Sistema de aglutinación	% de aglutinante
AIR 1.0%	AIR / AP	75% / 25%	Caja Fría	1.00%
Blanco 1.0%	AP	100%	Caja Fría	1.00%
Inorgánico	AP	100%	Silicato de sodio	1.75%

La Figura 4.24 se muestra el desarrollo de resistencia a 0.0, 2.0 y 24.0 h a condiciones de baja y alta humedad relativa para las condiciones con arena del proceso inorgánico recuperada (AIR), blanco (100% AP) y referencia con aglutinante inorgánico.

La resistencia inmediata tiende a ser mayor para corazones fabricados con la resina orgánica de caja fría, contraria al aglutinante inorgánico base silicato de sodio. La resistencia para la condición con arena del proceso inorgánico recuperada con 1.0% de resina de caja fría (AIR 1.0%) resulta similar al blanco con 100% de arena de proceso y 1.0% de resina de caja fría.

La resistencia en desarrollo a 2.0 y 24.0 horas a 30% de H.R. es mayor para el proceso con aglutinante inorgánico, algo normal para este tipo de proceso que alcanza resistencias altas de hasta 2.7 MPa. Para las condiciones de blanco y AIR 1.0%, las resistencias también son similares, estando entre 1.8 y 1.9 MPa. A condiciones de temperatura ambiente y humedad baja, la resistencia toma su valor máximo a las 2.0 h y se mantiene a 24.0 h.

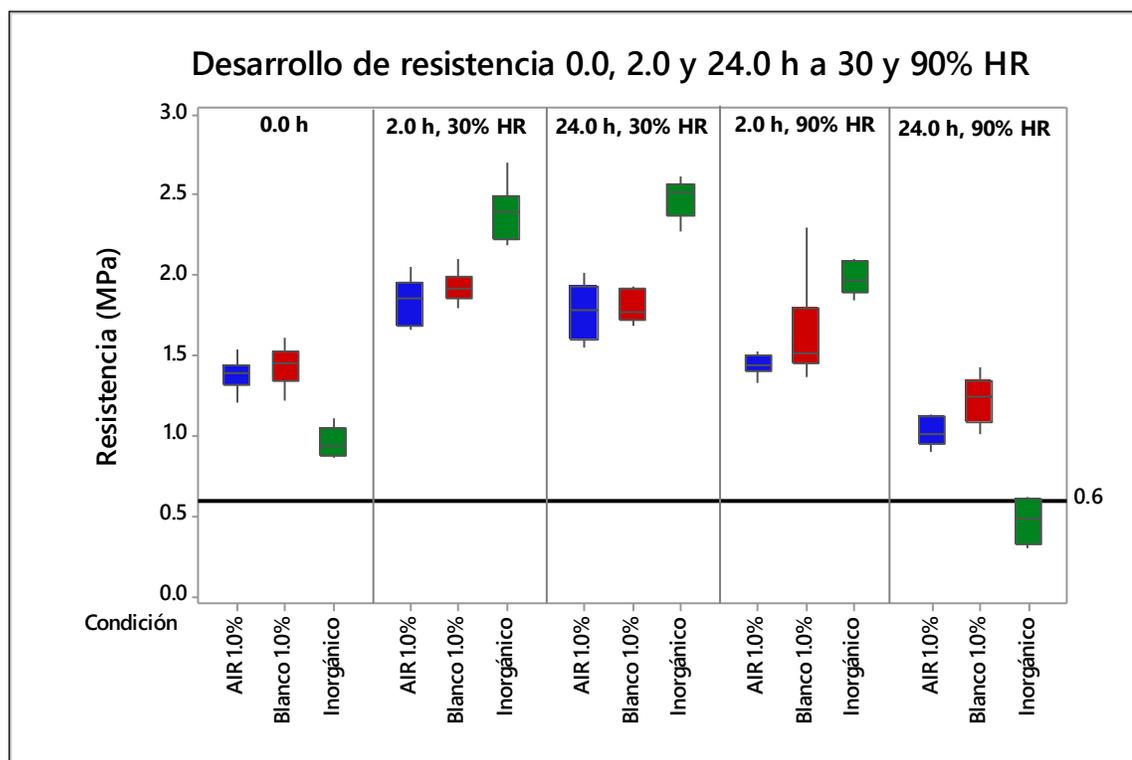


Figura 4.24 Desarrollo de resistencia a 30 y 90% de humedad ambiental

La resistencia en desarrollo a 2.0 y 24.0 horas a 90% de H.R., para las probetas del proceso inorgánico, la resistencia cae de 2.0 MPa en 2.0 h a 0.45 MPa en 24.0 h, estando fuera de especificación. Como se mencionó, la humedad afecta a los corazones del proceso inorgánico debido a la higroscopicidad del silicato de sodio. Para las condiciones de AIR 1.0% y blanco, la resistencia

disminuye por afectación de la humedad, sin embargo, siguen estando dentro de la referencia de 0.6 MPa.

4.7.2 Distorsión en caliente

Las pruebas de distorsión en caliente determinan la deformación del corazón a altas temperaturas. Además, se obtiene la expansión máxima de la probeta, el tiempo en el cual ocurre dicha expansión máxima y el tiempo máximo de fractura.

Al igual que en la prueba de desarrollo de resistencia a 2.0 y 24.0 horas, se realizan los mismos tipos de pruebas: AIR 1.0%, Blanco 1.0% e Inorgánico. Las pruebas y contenidos de arena y resina/aglutinante se muestran en la tabla 4.8.

La Figura 4.25 muestra el comparativo entre las tres probetas con sus distintas condiciones. Como se observa, hay un comportamiento diferente para los corazones con resinas fenólico-uretánicas de caja fría y los corazones con aglutinante inorgánico base silicato de sodio, la cual cada proceso tiene una diferente expansión máxima, un tiempo de expansión máximo y un tiempo de fractura. La Tabla 4.20 muestra los datos de distorsión en caliente para cada condición.

La Figura 4.26 muestra la distorsión máxima en milímetros, el cual se presentó en aquellas pruebas con las resinas de caja fría, obteniendo un promedio de distorsión máxima de 0.53 mm para la que tiene arena de proceso inorgánico recuperado (AIR 1.0%) y 0.45 mm para el blanco. La probeta con inorgánico presenta la menor distorsión con 0.34 mm (ver Tabla 4.20).

Tabla 4.20 Distorsión en caliente (mm) para cada condición

Tiempo (s)	AIR 1.0% CB	BLANCO 1.0% CB	INORGANICO
0	0.1531	0.1403	0.1179
1	0.2679	0.2551	0.1769
2	0.3571	0.3189	0.2358
3	0.4209	0.3699	0.2830
4	0.4847	0.4082	0.3066
5	0.4974	0.4209	0.3184
6	0.5102	0.4337	0.3302
7	0.5357	0.4464	0.3302
8	0.5230	0.4464	0.3420
9	0.4592	0.4337	0.3184
10	0.3316	0.3316	0.2830
11	0.1276	0.1658	0.2830
12	-0.1020	-0.0893	0.2476
13	-0.3827	-0.3699	0.2123
14	-0.7398	-0.7398	0.1887
15	-1.1480	-1.1097	0.1533
16	-1.6837	-1.5561	0.0590
17	-2.2321	-2.0408	-0.0708
18	-2.8954	-2.5893	-0.2476
19	-3.7883	-3.2653	-0.5660
20	-5.3444	-4.0944	-1.0495
21	-6.0000	-5.6760	-1.6038
22		-6.0000	-2.3349
23			-3.4906
24			-5.0012
25			-6.0000

La Figura 4.27 muestra el tiempo de distorsión máxima, el cual se es parecido para las tres probetas, obteniendo un tiempo promedio de 8 s para la probeta inorgánica, 7.8 s para el blanco y 6.7 s para la AIR (ver Tabla 4.21).

Tabla 4.21 Desarrollo de resistencia a 30 y 90% de humedad ambiental

Proceso	Distorsión máxima (mm)	Tiempo de distorsión máxima (s)	Tiempo de fractura (s)
AIR 1.0%	0.5357	7	20
	0.4819	6	22
	0.5102	6	21
	0.5823	10	24
	0.5789	5	19
	0.5199	6	20
BLANCO 1.0%	0.5202	8	25
	0.4209	9	23
	0.3416	5	18
	0.4464	8	22
	0.4926	9	24
	0.4285	8	20
INORGÁNICO	0.3421	8	25
	0.3189	9	28
	0.3788	7	31
	0.4011	8	22
	0.2896	8	22
	0.3411	8	26

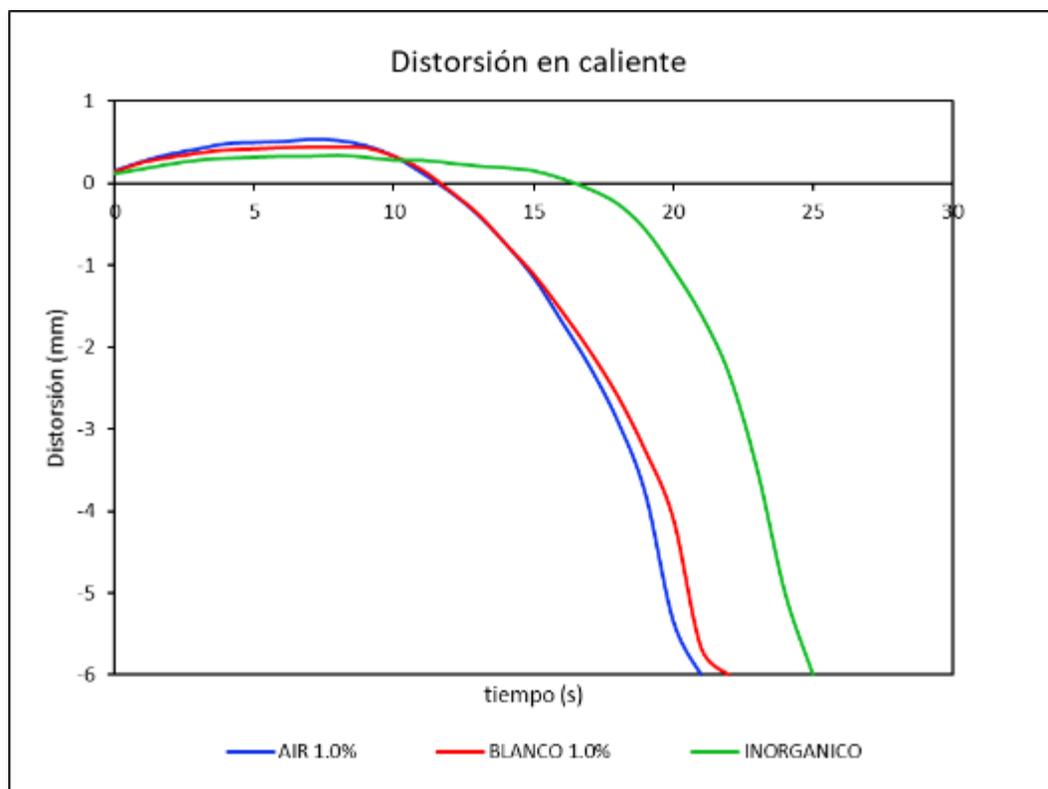


Figura 4.25 Distorsión en caliente en función del tiempo para las diferentes muestras estudiadas; inorgánico recuperada (AIR) 1.0%, inorgánico y blanco 1.0%

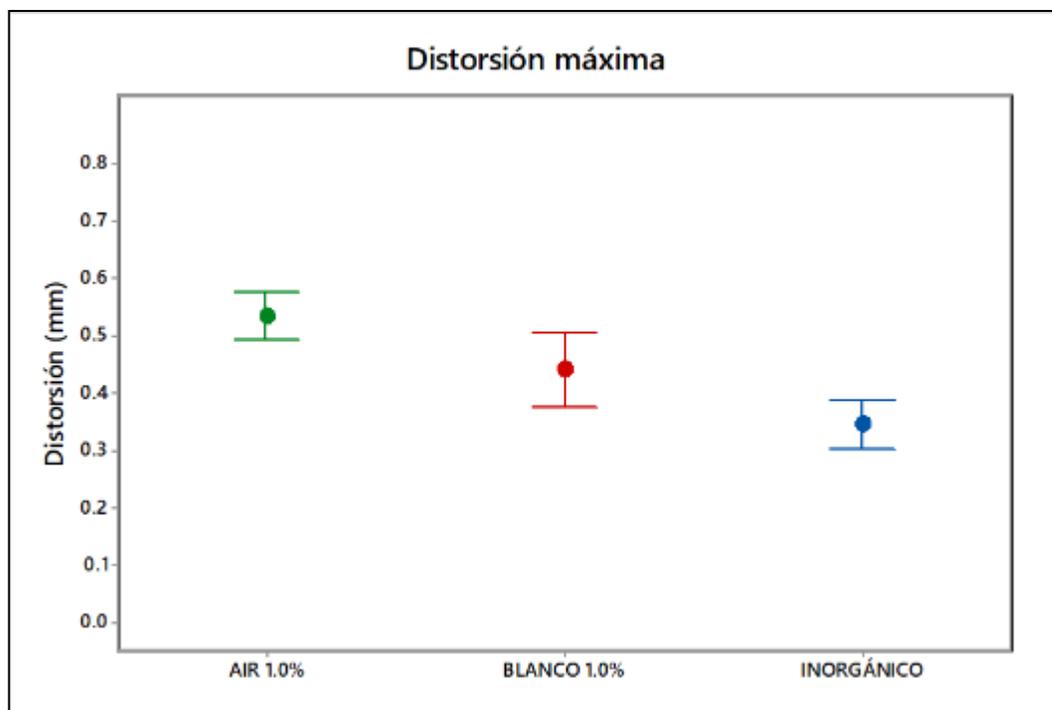


Figura 4.26 Comparación del valor de distorsión máxima entre las muestras preparadas; inorgánico recuperada (AIR) 1.0%, inorgánico y blanco 1.0%

En cuanto al tiempo total en que ocurre la fractura, se observa en la Figura 4.28 que los datos para las probetas con aglutinante inorgánico son las que resisten más, con 26 s. Las probetas con resina orgánica de caja fría, AIR 1.0% y blanco 1.0%, presentan un tiempo máximo de ruptura promedio de 22 s. Ver Tabla 4.18

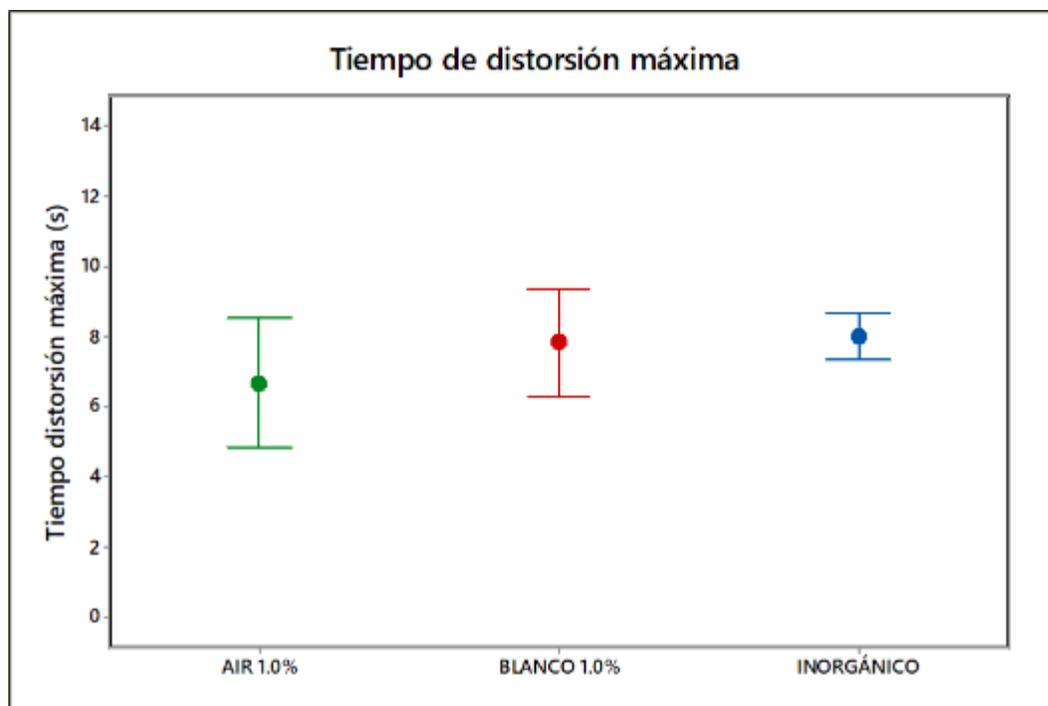


Figura 4.27 Comparación del tiempo de distorsión máxima para los diferentes muestras preparadas inorgánico recuperada (AIR) 1.0%, inorgánico y blanco 1.0%.

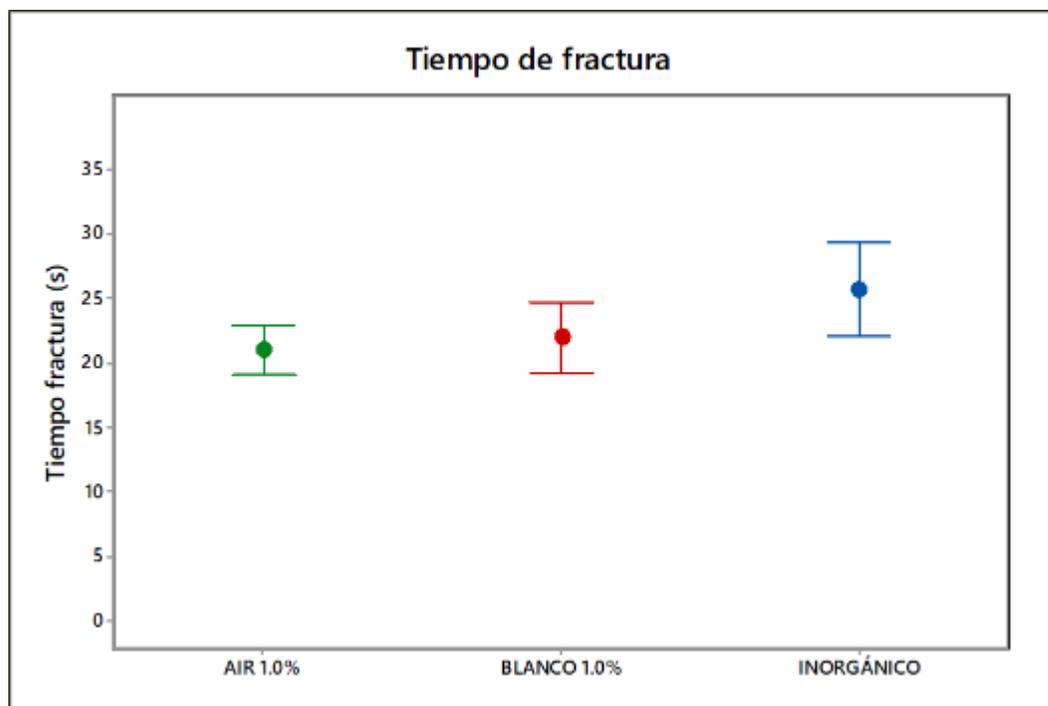


Figura 4.28 Análisis del tiempo de fractura para las muestras preparadas; inorgánico recuperada (AIR) 1.0%, inorgánico y blanco 1.0%.

Referencias

1. Druckrey A, Alshibli K, "3D characterization of sand particle-to-particle contact and morphology" University of Tennessee, EEUU. Volume 74, 26-35. 2016.
2. Carnin R, Valadares M, "Use of an integrated approach to characterize the physicochemical properties of foundry green sands" Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil. Volumen 523, 150-155. 2012.
3. PQ® Sodium Silicates. "PQ® Liquid and Solid, Sodium Silicates Physical Properties" PQ Corporation. Industrial Chemical Division. 2009.
4. Poljansenk, I., Krajnc, M. "Characterization of phenol-formaldehyde prepolymer resins by in line FT-IR spectroscopy". Acta Chim. Slov. 52: 238-244. 2005.
5. Falcone J, Bass J. "The Determination of Sodium Silicate Composition Using ATR FT-IR". Department of Chemistry, West Chester University of Pennsylvania, 6287-6290. 2010.
6. Kmita A, Knauer W. "The decomposition process and kinetic analysis of commercial binder based on phenol-formaldehyde resin, using in metal casting". AGH University of Science and Technology, Academic Centre for Materials and Nanotechnology, Krakow, Poland. Applied Thermal Eng., Volume 156, 263-275. 2019.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la discusión de los resultados obtenidos en la caracterización de arenas y aglutinantes, así como de los resultados de los distintos métodos de recuperación usados para la arena recubierta con silicato de sodio; y del desarrollo de resistencia de las probetas fabricadas con resina de caja fría y arena ya recuperada.

5.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

El tipo de arena juega un papel fundamental en los resultados obtenidos para la recuperación de la arena recubierta con silicato de sodio, ya que pudiera haber cambios en sus propiedades como en su distribución granulométrica, porcentaje de finos, pH, demanda de ácido (ADV), morfología, etc. Valores como el pH o ADV dependen de la misma composición química de la arena, así como los contaminantes que contenga ésta.

5.2.1 Efecto del tipo de arena usada para las pruebas de recuperación

Como se mencionó en el capítulo 3, la arena usada fue la arena de proceso que previamente ha sido recuperada térmicamente. Un valor de pH de 8.9 y un valor de ADV de 1.8 de la arena de proceso usada en esta investigación significan que existen en la arena componentes alcalinos generados por la previa recuperación térmica a más de 550°C, tales como óxido de calcio y óxido de aluminio. Esto se debe a la presencia de contaminantes en la arena como carbonatos de calcio, y partículas de aluminio y fierro, derivados del mal manejo

de ésta. Aunado a esto, el uso de aglutinantes inorgánicos base silicato hacen que los valores de pH y ADV aumenten todavía más, ocasionando que la recuperación se vuelva más complicada.

El alto contenido de Al_2O_3 se debe al contenido de arena sintética usada en el proceso para la fabricación de ciertos corazones de arena, así como la contaminación de rebabas de aluminio provenientes del proceso de fundición de este metal. En la Figura 5.1 se pueden observar los granos oscuros pertenecientes a la arena sintética, así como otros contaminantes de la arena de proceso y su comparación con la arena nueva. La coloración amarillenta de la arena recuperada térmicamente se debe a condensados de resinas formados sobre la superficie de los granos.

En cuanto a la composición química de la arena recubierta con silicato de sodio (ARSS), en la cual se usó arena de proceso recuperada térmicamente, se observa un incremento de un 65% de contenido de Na_2O , la cual se debe principalmente al 2.0% de la solución acuosa silicato de sodio añadido a la arena de proceso para fabricar la ARSS. Como se comentó en los capítulos 3 y 4, la solución de silicato contiene un 45% de sólidos y el resto es agua; y la relación $SiO_2:Na_2O$ es de 2:1.

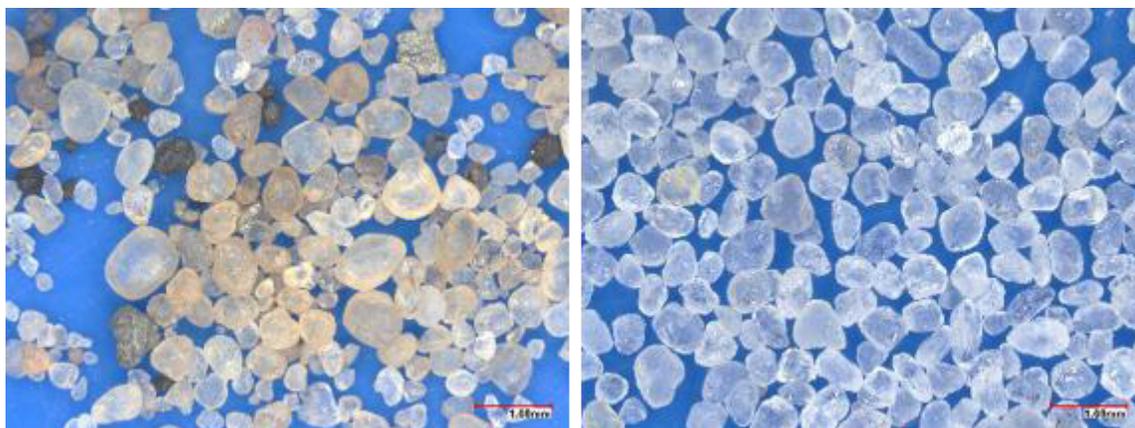


Figura 5.1 Comparativo entre arena de proceso recuperada térmicamente (izquierda) y arena nueva (derecha).

5.2.2 Efecto del tipo de aglutinante inorgánico usado para las pruebas de recuperación

Los valores de pH dependerán mucho del tipo de silicato de sodio usado. Como ya se comentó, para esta experimentación se usó el silicato de sodio comercial o vidrio soluble, usado principalmente para el área de fundición, con una relación de 2:1 de $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$. 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 [1].

Un diferente tipo de silicato de sodio puede cambiar las condiciones de recuperación de la arena recubierta con silicato. La Figura 5.2 muestra el diagrama ternario a temperatura ambiente mostrando cambios de fase del silicato de sodio dependiendo 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 [2]. El 9 representa el silicato de sodio comercial (o vidrio soluble) usado en esta experimentación.

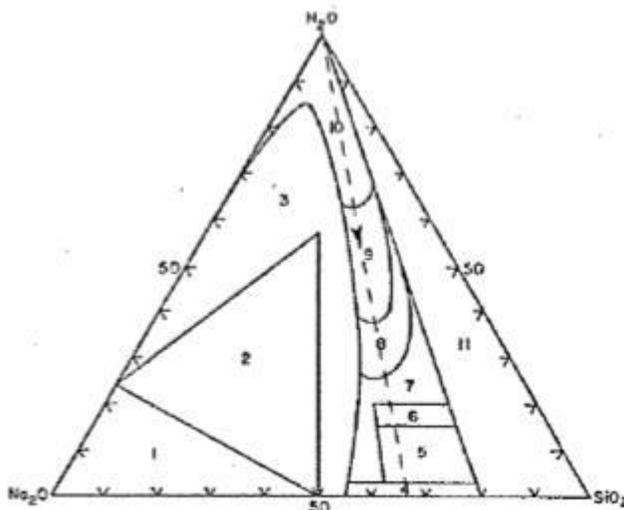


Figura 5.2 Diagrama ternario a temperatura ambiente mostrando cambios de fase del silicato de sodio dependiendo del contenido de agua.

El análisis termo-gravimétrico de la solución de silicato de sodio indica que es un silicato con alrededor de un 45% de sólidos, por lo que este representa un silicato comercial, en donde el resto de la solución representa agua.

En cuanto al análisis por espectroscopía de infrarrojo, Bok Ryu y col. [3] mencionan que los silicatos de sodio comerciales usados en fundición presentan una banda de absorción de vibración por estiramiento del Si-O característica alrededor de los 1050 y 1100 cm^{-1} , así como bandas de absorción debidas a moléculas unitarias hidratadas alrededor de los 3500 cm^{-1} . De acuerdo a lo reportado (Figura 5.3), el resultado del espectro FTIR de la solución de silicato concuerda con el estudio.

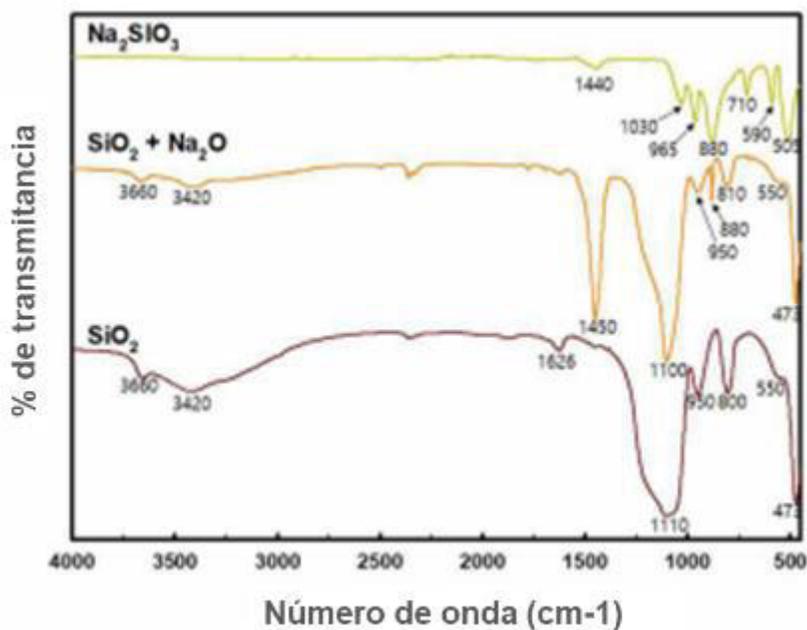


Figura 5.3 Espectro FTIR para SiO_2 y silicato de sodio.

5.3 RECUPERACIÓN QUÍMICA

En el método de recuperación química, el silicato está presente en forma sólida, ya que este fue deshidratado para formar el corazón de arena. De este modo, en vez de ocurrir una reacción química de polimerización / gelación del silicato, ocurre una “acidificación” del grano de arena sílice, disminuyendo su pH hasta el valor deseado de 7.

5.3.1 Efecto del ácido fosfórico en la recuperación de la arena y propiedades mecánicas

El ácido fosfórico es usado como elemento retardante de llama en resinas fenol-formaldehído [4,5], por lo que este aditivo no perjudicó las propiedades de las resinas al momento de la fabricación de las probetas, como lo fue en el resto de los otros aditivos.

El ácido fosfórico se condensa para dar estructuras fosforiladas que desprenden agua, dando lugar a una capa protectora carbonosa compuesta de ácidos deshidratantes y agentes de entrecruzamiento, reduciendo el proceso de combustión de diversos tipos de polímeros, como los base fenol-formaldehído. Estas estructuras fosforadas también forman radicales libres, actuando como secuestradores de radicales $H\cdot$ y $OH\cdot$ [6]. (Ver figura 5.4).

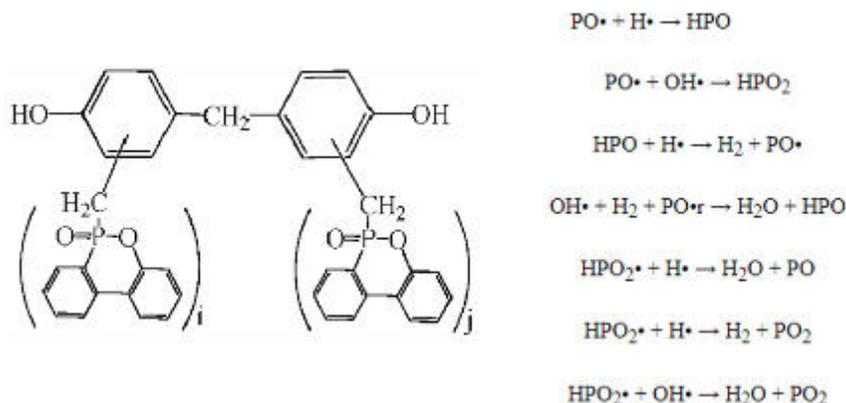


Figura 5.4 Estructura del fenol-formaldehído conteniendo estructuras base fósforo y formación de radicales libres [6].

Debido a lo anterior, el ácido fosfórico tuvo un efecto positivo en el desempeño de las propiedades mecánicas y vida de banco en los materiales usando 25 y 50% de arena recubierta con silicato de sodio (ARSS), sin embargo, no tuvo resultados óptimos usando 75% de RSS. El efecto del H_3PO_4 en las propiedades mecánicas se observan en la figura 5.5.

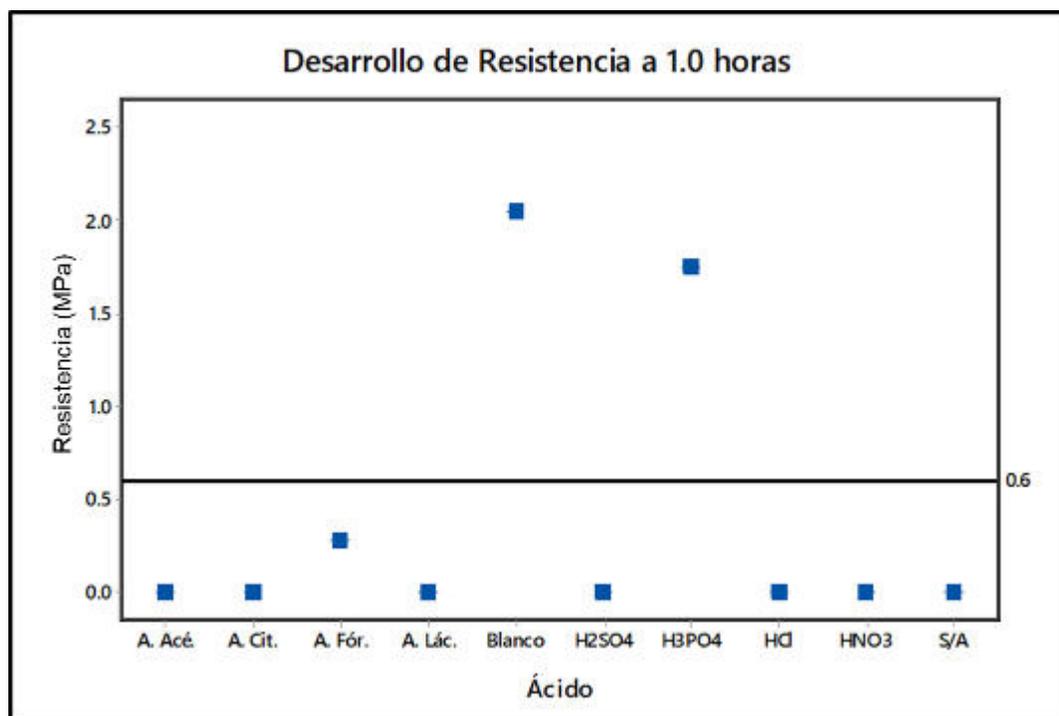


Figura 5.5 Desarrollo de resistencia a 1.0 horas usando 50% de arena RSS para los distintos ácidos.

5.3.2 Efecto de otros ácidos en la recuperación de la arena y propiedades mecánicas

Como se observa en la Figura 5.6, a diferencia del ácido fosfórico, el resto de los ácidos usados no desarrollaron suficiente resistencia mecánica. Aunque las concentraciones de ácido en la arena variaron de 0.1 a 0.5% para disminuir su pH, estas tuvieron un efecto negativo en las resinas fenólicas, ocasionando reacciones adversas entre el fenol-formaldehído y el diisocianato para formar el poliuretano.

El poliuretano formado pudo haber reaccionado con los distintos ácidos, formando alcohol, CO_2 y una amina secundaria, como se observa en la Figura 5.6. [7].

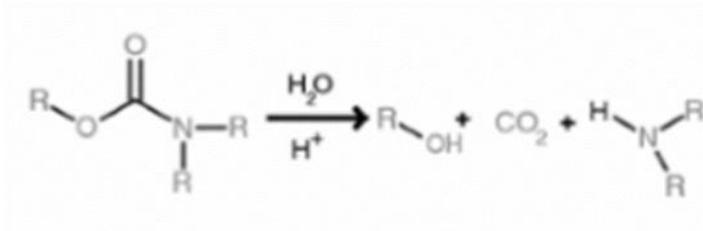


Figura 5.6 Degradación del uretano en medio ácido [7].

En el caso del ácido nítrico, este pudo haber reaccionado con el precursor fenol, oxidándose para formar un aldehído y ácido nitroso, como se observa en la Figura 5.7. [7].

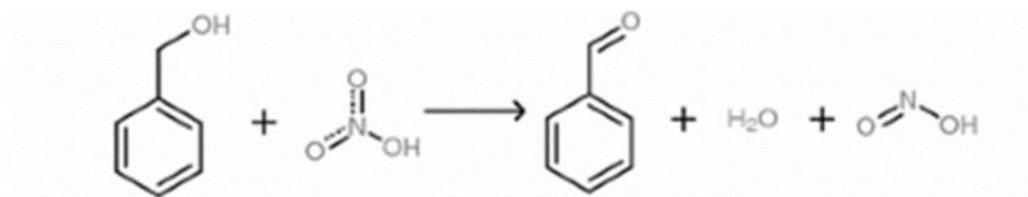


Figura 5.7 Oxidación del fenol con ácido nítrico [7].

5.4 RECUPERACIÓN MECÁNICA

Mediante la atrición mecánica de los granos de arena recubiertos con silicato de sodio, se van generando una importante cantidad de finos, que estos básicamente son restos de la capa de silicato y de partículas de sílice proveniente de los granos de arena.

5.4.1 Efecto de la atrición mecánica de la arena en sus propiedades

Al ir generando mayores presiones y tiempos de atrición mecánica, tanto el AFS como el porcentaje de finos fue aumentando, disparándose inclusive hasta un AFS de 52 y un porcentaje de finos de 2.0. En cuanto al pH, no hubo disminución de éste una vez que se removieron los finos de la arena.

La Figura 5.8 muestra una imagen de un grano de arena obtenida por microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés), en donde se observa presencia de finos de arena sobre la superficie del grano, resultante del proceso de atrición mecánica al cual fue tratada.

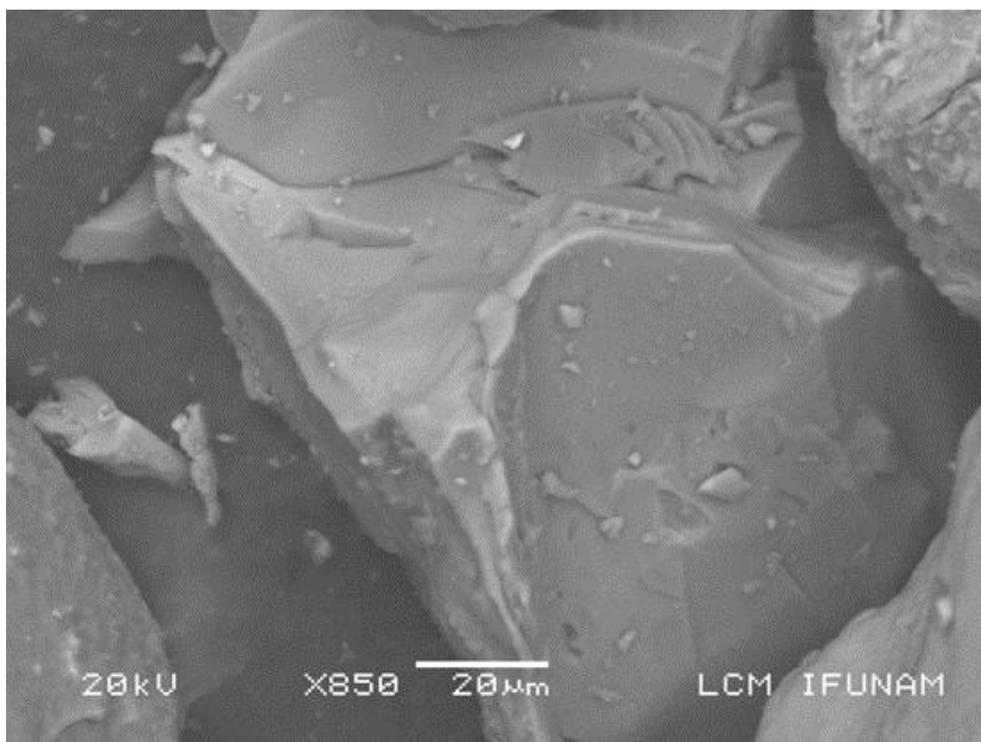


Figura 5.8 Grano de arena sílice pasado por atrición mecánica.

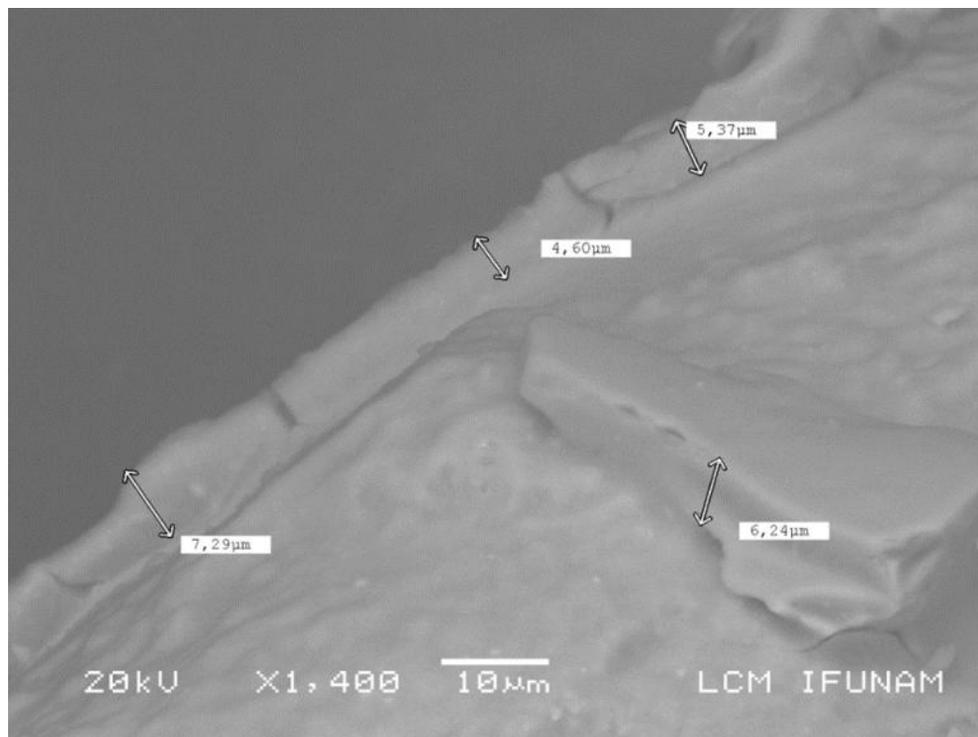


Figura 5.9 Capa de silicato de sodio fracturada presente sobre el grano de arena sílice.

La Figura 5.9 muestra una imagen de un grano de arena, en donde se observa una capa de silicato de sodio bien formada, y a su vez, agrietada debido al efecto de la atrición mecánica por la que pasó la arena. Esta presencia todavía de capas de silicato de sodio ocasionó el pH alto de la arena pasada por recuperación mecánica, las cuales no pudieron ser removidas aun a altos tiempos y presiones de atrición.

Se realizó un microanálisis químico por EDS acoplado al SEM de esa capa de silicato presente sobre el grano de arena, el cuál mostró una alta concentración de sodio, proveniente del mismo silicato de sodio usado como aglutinante. Este análisis se muestra en la Figura 5.10.

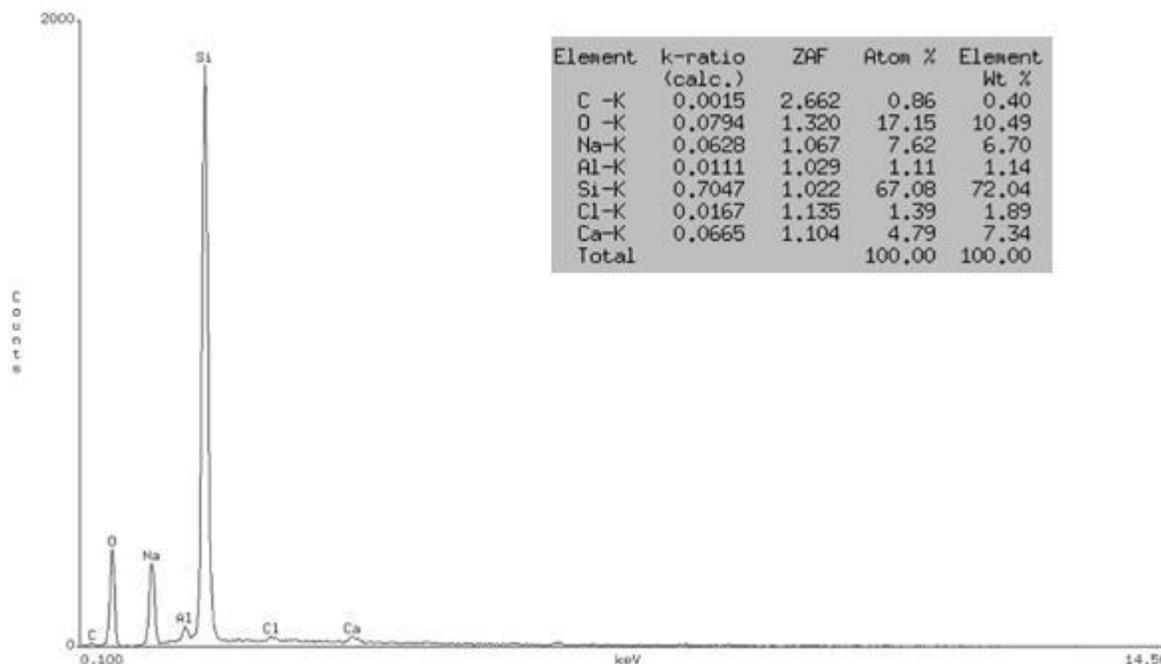


Figura 5.10 Espectro EDS que muestra el análisis químico de la capa de silicato de sodio en la superficie de un grano fracturado.

5.5 RECUPERACIÓN ACUOSA

Los tres métodos de lavado cumplieron con los resultados de pH y propiedades mecánicas, aunque usando tres ciclos (un enjuague y dos lavados), con el fin de eliminar remanentes de sodio o ácido en la arena. Los ciclos de lavado entre 15, 30 y 45 minutos no representan un factor para tener el nivel de pH neutro óptimo, como se mencionó.

5.5.1 Efecto del lavado en el pH de la arena y sus propiedades mecánicas

Para los lavados con agua fría (25°C) y agua caliente (en ebullición), no hay mucha diferencia en los valores de pH debido a que, al agitar con el mezclador el agua fría con la arena, esta crea la fricción suficiente como para que la temperatura del agua suba al menos a 70°C.

En cuanto al lavado con ácido, la diferencia se observa en los primeros dos ciclos ya que, al haber remanentes de HCl, el pH está muy por debajo del nivel de pH neutro que debe tener la arena para volver a usarse en el proceso de fabricación de corazones de caja fría.

Mediante el microanálisis químico realizado por EDS acoplado a la técnica de análisis por microscopía electrónica de barrido, se analizaron los granos de arena de diferentes tipos de muestras tratadas por el proceso de lavado, así como el comparativo con las referencias: arena nueva como referencia; arena recubierta con silicato de sodio; arena de proceso inorgánico lavada con agua fría; y arena de proceso inorgánico lavada con HCl 0.5N.

La Tabla 5.1 muestra el contenido elemental del silicio, sodio, oxígeno, calcio y cloro para cada muestra de arena. Otros elementos pueden ser el aluminio, carbono, potasio, etcétera.

En la Figura 5.11 se presenta la gráfica de la Tabla 5.1, donde se observa el contenido elemental obtenido por EDS de cada muestra de arena, observándose las diferencias para cada tipo de muestra.

Tabla 5.1 Comparativo de análisis químico elemental de las diferentes muestras de arena

% Elemental	Arena nueva	Arena recubierta con silicato	Arena lavada con agua fría	Arena lavada con HCl
Si	91.0	72.0	81.0	36.0
Na	0.0	7.0	0.6	2.5
O	9.0	10.5	6.5	3.0
Ca	0.0	7.0	9.5	4.0
Cl	0.0	2.0	2.0	54.0
Otros	0.0	1.5	0.5	0.5

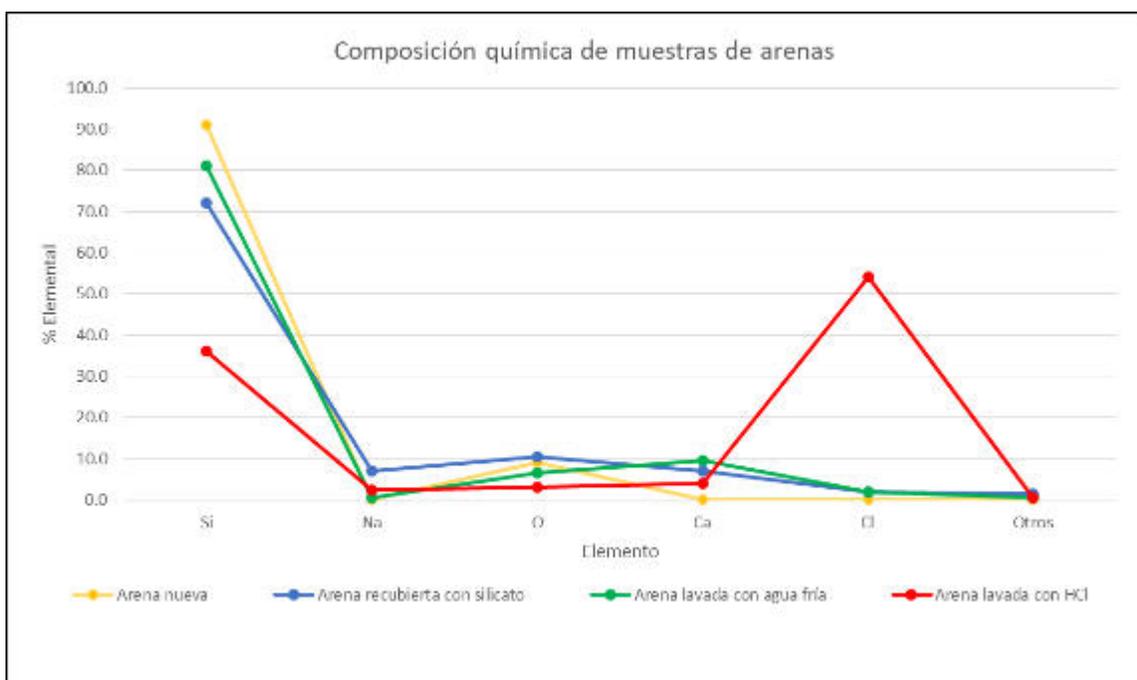


Figura 5.11 Comparativo en gráfica de análisis químico elemental de las diferentes muestras de arena.

La arena nueva, esto quiere decir, que no ha pasado por ningún método de recuperación, contiene principalmente silicio (85%) y oxígeno (15%), que es la composición química de la arena de sílice, el dióxido de silicio (SiO_2). Esta muestra se toma como referencia para los otros tipos de arena.

También fue analizada por EDS la arena recubierta con silicato de sodio y posteriormente curada por calor (ARSS). Esta muestra sirve, al igual que la arena nueva, como referencia. Como se observa en la Tabla 5.1, además del contenido de silicio (72%) y oxígeno (10.5%) que representan el SiO_2 , también se encuentran presente el sodio (7%), que, junto con el oxígeno, provienen del silicato de sodio. El cloro (2%) y el calcio (7%) probablemente provengan del agua contenida en el silicato de sodio soluble.

En cuanto a la muestra de arena del proceso inorgánico recuperada por lavado usando agua fría, se observa una importante disminución del sodio proveniente del silicato, con un 0.6%. El calcio está presente en un 9.5% derivado probablemente de la dureza del agua de lavado y enjuague. En el capítulo 3, Tabla 3.6, se puede observar la calidad química del agua.

La muestra de arena del proceso inorgánico recuperada por lavado usando HCl mostró un alto porcentaje de cloro (54%) remanente del proceso de lavado sin tener algún tipo de enjuague. Debido a esto, el pH de la muestra de arena lavada con ácido clorhídrico sin enjuagar es aún muy bajo, estando entre un valor de 1 a 2. En cuanto al porcentaje de sodio, este disminuyó a un 2.5% comparado al 7% que tiene la referencia. En la Figura 5.12 se muestra el comparativo del sodio, donde se observa que el lavado con agua fría fue efectivo para la reducción de este elemento.

Las Figuras 5.13 a 5.16 se presentan los análisis químicos realizados por energía dispersiva de rayos X en el SEM de cada una de las muestras analizadas.

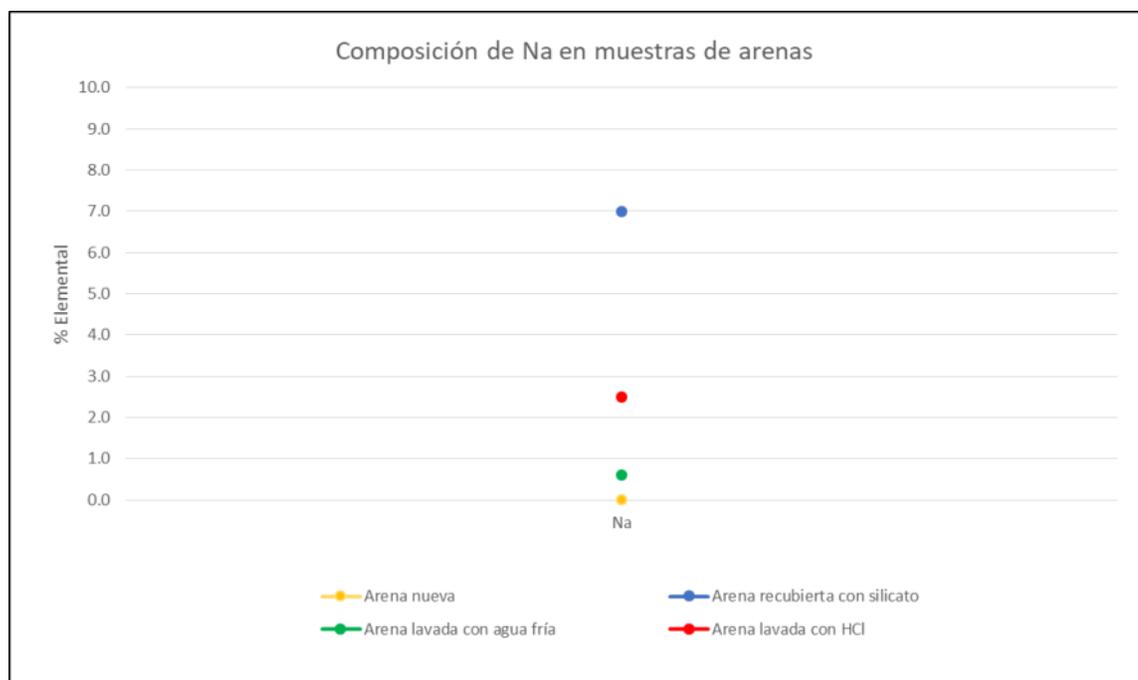


Figura 5.12 Comparativo de análisis químico elemental del sodio de las muestras de arena.

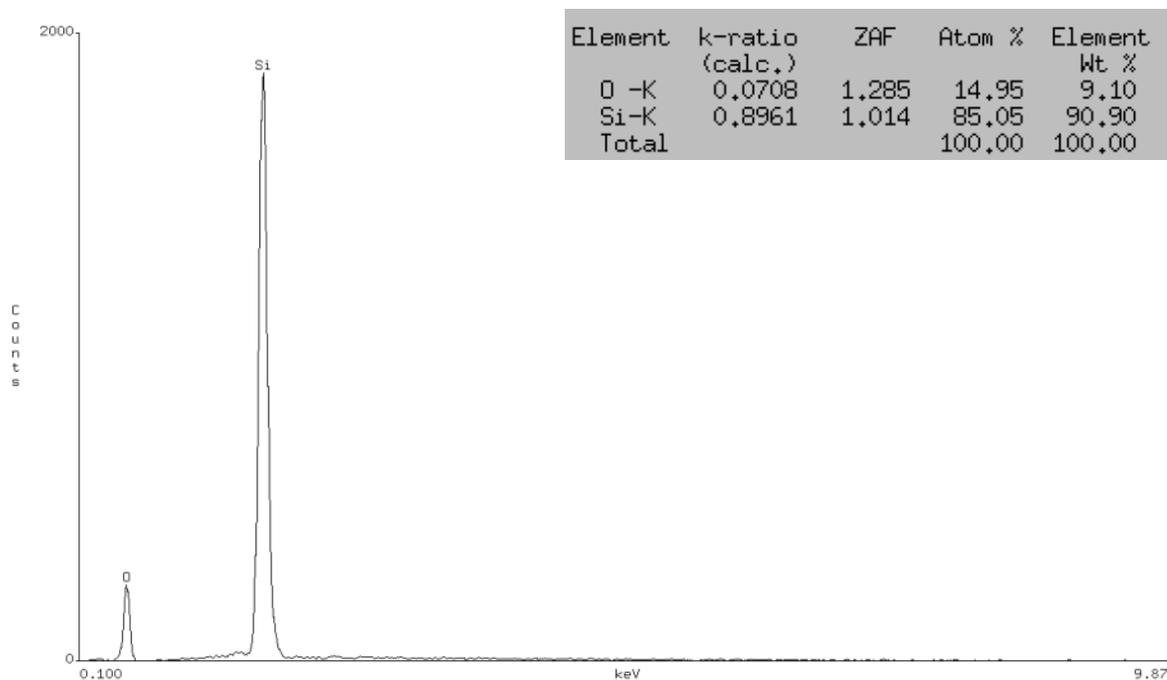


Figura 5.13 Espectro EDS que muestra el análisis químico de la arena nueva.

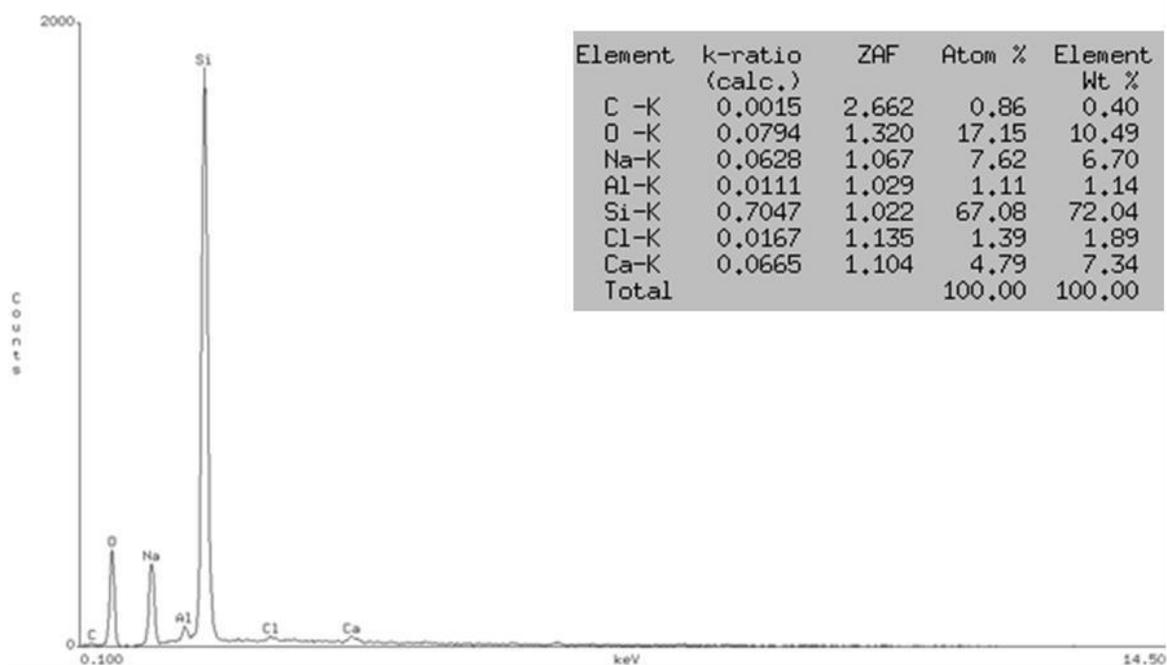


Figura 5.14 Espectro EDS que muestra el análisis químico de la arena recubierta con silicato de sodio.

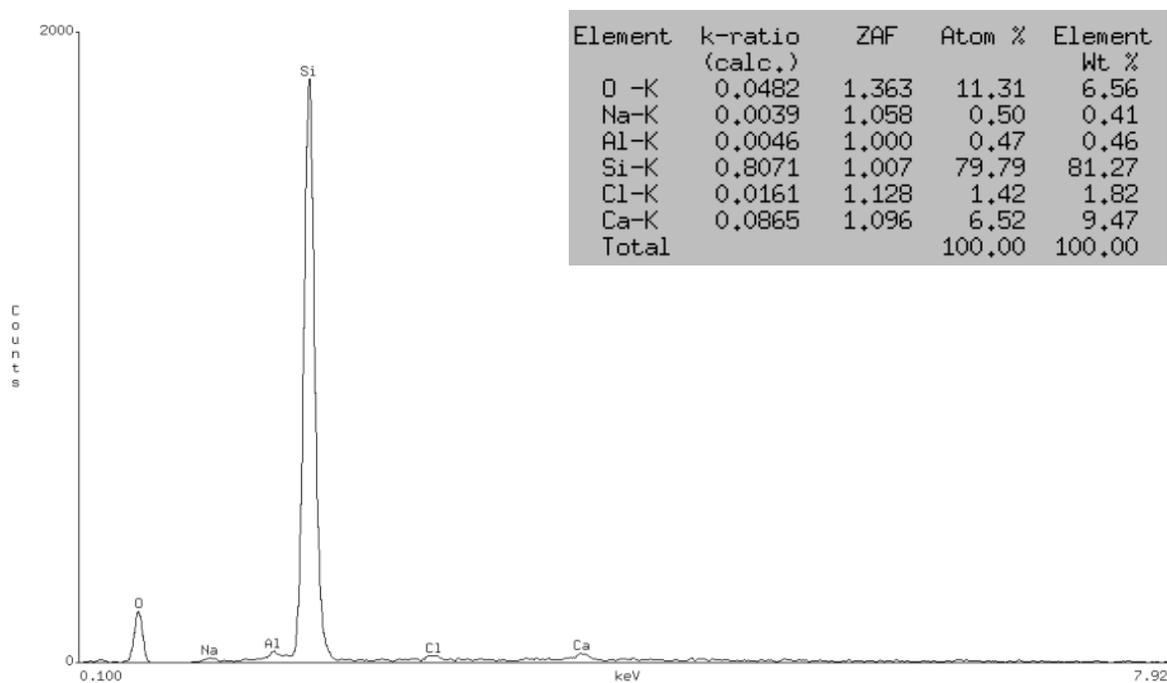


Figura 5.15 Espectro EDS que muestra el análisis químico de la arena del proceso inorgánico lavada con agua fría.

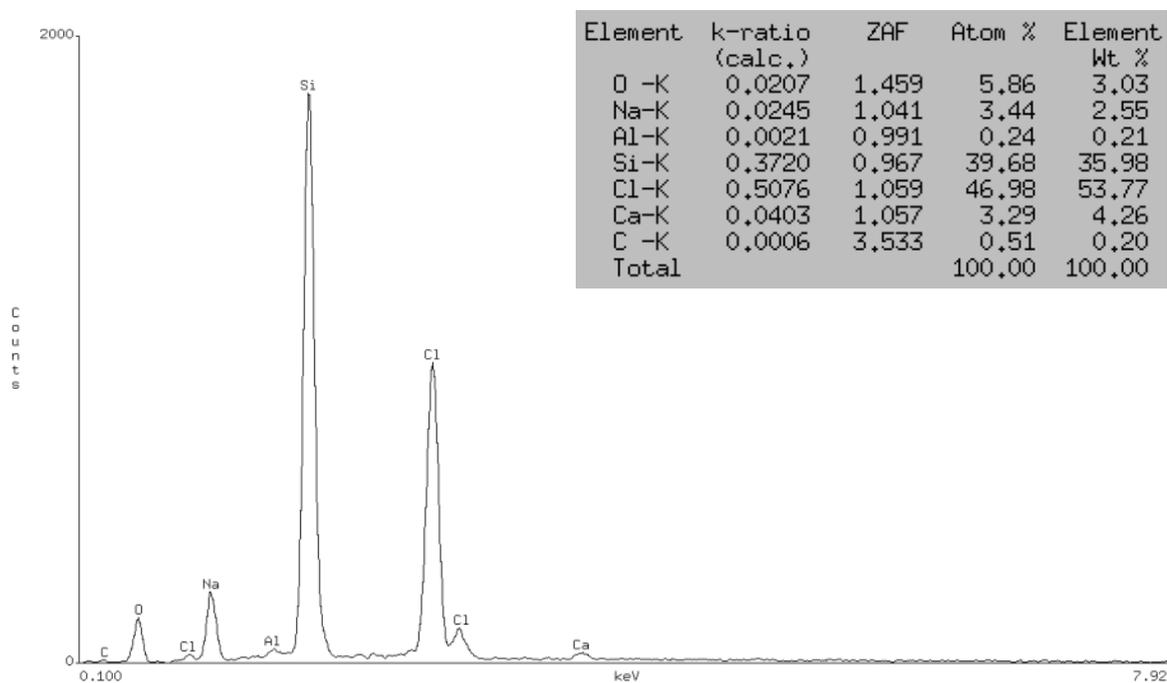


Figura 5.16 Espectro EDS que muestra el análisis químico de la arena del proceso inorgánico lavada con HCl.

5.6 ENSAYOS MECÁNICOS

5.6.1 Efecto de la humedad en las propiedades mecánicas

Como era de esperarse y, de acuerdo a los resultados de propiedades mecánicas, se presentó una caída de desarrollo de resistencia a la tensión de un 55% para las probetas del proceso inorgánico a 24.0 horas y 90% de humedad relativa, comparado con la muestra testigo. El silicato de sodio higroscópico ocasionó esa caída de resistencia, afectando los puentes entre granos de arena de sílice, como se observa en la Figura 5.17 [8].

En cuanto a las probetas fabricadas con arena de proceso inorgánica recuperada por lavado (AIR), las propiedades de resistencia a la tensión a altas humedades relativas se vieron bastante similares a las muestras testigos, lo que nos indica nuevamente una reducción efectiva del silicato de sodio por el proceso de lavado con agua.

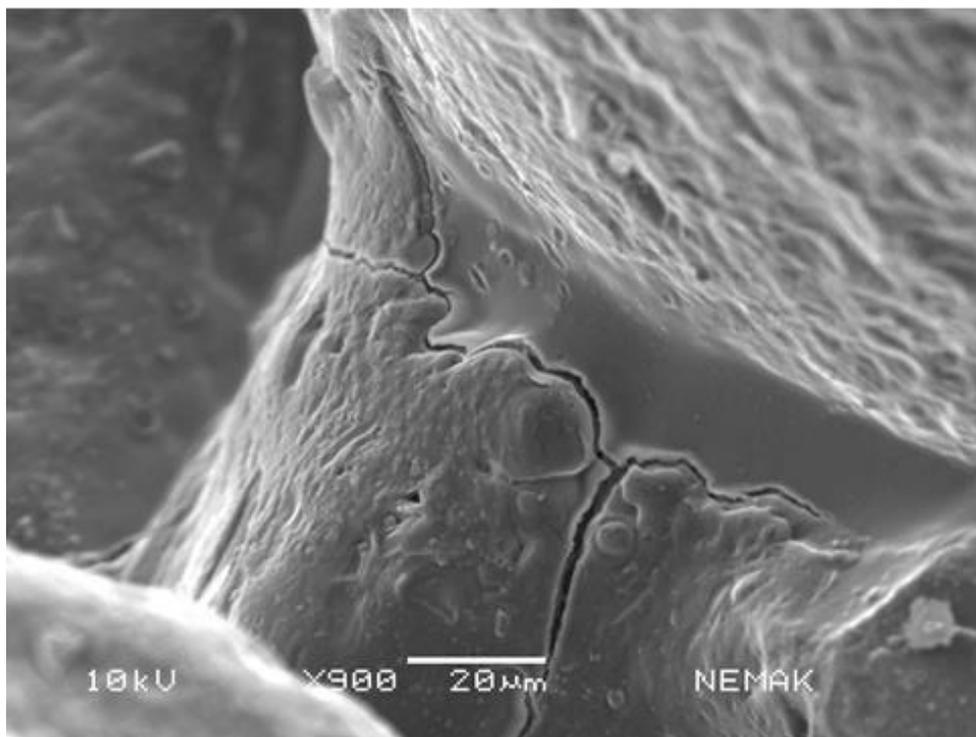


Figura 5.17 Puente de aglutinante inorgánico afectado por la humedad ambiental.

5.6.2 Efecto del lavado en la morfología de la arena

En la Figura 5.18 se observa la morfología de los granos de arena de proceso recuperada térmicamente, observándose opacidad y coloración amarillenta y rojiza en la mayoría de los granos debido a la presencia de condensados provenientes de las resinas orgánicas. En la Figura 5.19 se ven los granos de arena recubiertos con silicato de sodio, en donde no se observa una notable diferencia entre esos granos y los de la arena de proceso recuperada térmicamente. Sin embargo, al recuperar por medio de lavado con HCl 0.5N esa arena recubierta con silicato de sodio, se aprecia un efecto traslúcido o más brillante en los granos de arena. Esto se puede explicar debido a la remoción de no solo del silicato, sino de también de los componentes orgánicos condensados sobre los granos de arena, limpiando los granos debido a la agitación vigorosa que se hace al lavar la arena (Figura 5.20).



Figura 5.18 Granos de arena de proceso recuperada térmicamente.

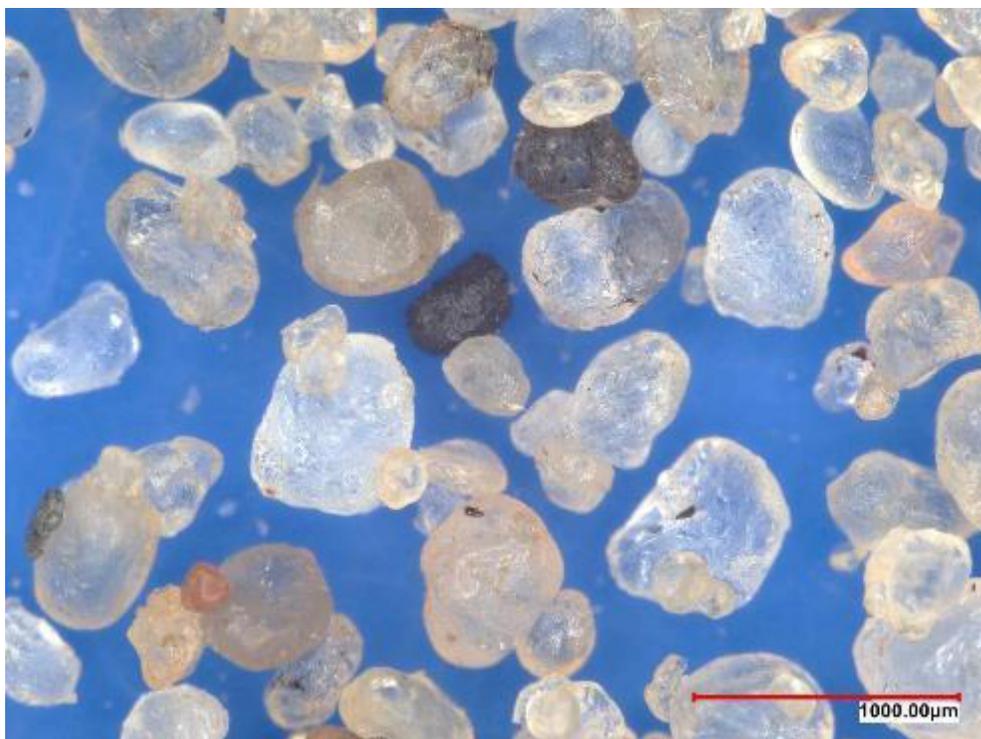


Figura 5.19 Granos de arena recubierta con silicato de sodio.



Figura 5.20 Granos de arena inorgánica recuperada por lavado con HCl 0.5N.

5.6.3 Distorsión y resistencia en caliente

El efecto de la distorsión para las probetas con arena recubierta con silicato de sodio presentó la menor distorsión máxima en milímetros. Además de esto, su resistencia en caliente es mayor debido al carácter cerámico del mismo silicato de sodio [9]. Para las pruebas testigo y con arena inorgánica recuperada por lavado (AIR), la resistencia en caliente es menor, debido a la plasticidad que presentan las resinas orgánicas de Caja Fría, así como también su distorsión. La similitud del comportamiento térmico y dimensional de las probetas con arena de proceso y arena recuperada por lavado mostrado en el capítulo 4 muestra que el mismo proceso de lavado funcionó para mantener las condiciones integrales del corazón.

Referencias

1. Srinagesh, K. "Chemistry of sodium Silicate as a Sand Binder". AFS International Cast Metals journal, 1991.
2. García N, Ingram M. "Ion transport in hydrated sodium silicates (water glasses) of varying water content". Department of Chemistry, University of Aberdeen, Meston Building, Meston Walk, Aberdeen AB24 3UE, Scotland, UK. Volume 146, 113-122. 2002.
3. Bok Ryu Y, Sig Lee M. "Infrared Spectra and Thermal Properties of Sodium Silicate Solutions". Green Materials & Process Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan 44413, Republic of Korea. Korean J. Met. Mater. Vol. 56, 72-78. 2017.
4. Dorn, K (1994). "Method for making phenol-formaldehyde resins flame-resistant", Patente de Estados Unidos US5607990A.
5. Schartel B, "Phosphorus-based Flame Retardancy Mechanisms—Old Hat or a Starting Point for Future Development?" Materials (Basel). (10): 4710–4745. 2010.
6. Shen, Qi (2015). "Phosphor-containing phenol formaldehyde resin compound and flame-retardant epoxy resin hardener made from thereof", Patente de la Unión Europea EP2985300A1.
7. Buhl Moeller, V. "Acid-resistant organic coatings for the chemical industry: a review". Technical University of Denmark. Journal of Coatings Technology and Research volume 14, 279–306. 2017.
8. Sáenz A. "Desarrollo de un aglutinante inorgánico para la producción de corazones de arena en la industria automotriz". Tesis de Maestría, UANL, México. 2010.
9. Bobrowski A, "Thermal deformation of molding and core sands with an inorganic binder containing a relaxation additive" AGH University of Science and Technology in Kraków, Archives of Foundry Engineering 18(4):93-98. 2018.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis de resultados y sus discusiones, se deducen las siguientes conclusiones:

La arena recubierta con silicato de sodio contiene 0.65% más contenido de Na_2O que la arena de proceso previamente recuperada térmicamente, lo que ocasiona un aumento del valor de pH y demanda de ácido de esta arena.

El silicato de sodio usado en esta investigación fue un vidrio soluble tipo comercial con una relación de 2:1 de $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$.

En la recuperación química, la mayoría de los ácidos usados en la presente investigación tienen un efecto negativo directo en las resinas fenólicas-uretánicas de caja fría, provocando una fuerte caída en sus propiedades mecánicas, a pesar de que lograron disminuir su pH a valores entre 7 y 9. Debido a su uso en resinas de caja fría como agente retardante de flama, el ácido fosfórico fue el único ácido que tuvo un efecto positivo en las propiedades mecánicas usando 25 y 50% de ARSS, aunque con 75% de ARSS, las propiedades mecánicas cayeron casi un 100%.

En cuanto a la recuperación mecánica, la atrición no fue capaz de eliminar en su totalidad la capa de silicato de sodio presente en los granos de arena de

sílice, a pesar de que los finos de arena provocados por el proceso de atrición fueron previamente analizando durante el análisis de pH.

Referente a la recuperación por métodos acuosos, los tres métodos por lavado fueron capaces de reducir los valores de pH, además de obtener valores de resistencia a la tensión superiores a la referencia, que son 0.6 MPa. Sin embargo, los métodos que dieron mejores propiedades mecánicas fueron usando agua caliente y agua fría. La arena lavada con ácido clorhídrico presentó altos picos de cloro, por lo que remanentes de ese elemento reaccionaron con las resinas de caja fría, provocando que sus resistencias no fueran tan altas comparadas a los otros dos, cayendo sus valores un 13% comparados a los otros dos métodos.

Para evitar el uso de agua caliente por temas de seguridad y costos energéticos, se prefirió hacer el análisis completo del método de lavado con agua fría, obteniendo valores de desarrollos de resistencia y vida de banco muy similares a la muestra testigo que usa arena de proceso. A su vez, estos valores no fueron afectados por la alta humedad relativa de la prueba, común para los corazones fabricados con aglutinantes base silicato de sodio, por lo que se puede concluir que el método de lavado con agua fría fue efectivo para reducir casi en su totalidad el silicato de sodio presente en los granos de arena. Similar que para las pruebas de desarrollo de resistencia y vida de banco, los valores de distorsión y resistencia en caliente mostraron valores similares a la muestra testigo.

6.2 RECOMENDACIONES

Se plantean las siguientes recomendaciones para trabajos de investigación futuros:

- Continuar trabajando con la recuperación acuosa de la arena recubierta con silicato de sodio proveniente de las fundiciones.
- Desarrollar pruebas de laboratorio con arena recuperada por el proceso de lavado usando otros tipos de resinas orgánicas, como son las furánicas.
- Disminuir los ciclos de lavado/enjuague con agua fría con el fin de optimizar los tiempos de recuperación acuosa. Inclusive se podría eliminar un ciclo de enjuague.
- Evaluar posibles defectos en piezas vaciadas debido al uso de la arena recuperada por lavado, como evolución de gases o arena penetrada en el metal.
- Diseñar pruebas usando el método de recuperación térmico-mecánico con el fin de evaluar la reducción o remoción del silicato a temperaturas de 500°C.
- Trabajar con otros tipos de silicatos de sodio usados comúnmente en las distintas fundiciones donde manejan el proceso inorgánico, ya que éstos manejan distintos tipos de aditivos que le dan propiedades específicas al corazón.
- Desarrollar un método de reciclado de agua usada para recuperar la arena proveniente del proceso inorgánico.
- Elaborar un proceso de manufactura y evaluar equipos y materiales que se requerirían para el lavado de la arena de proceso inorgánico.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Depósito de arena de sílice en Wisconsin, EEUU	7
Figura 2.2	Granos de arena cromita	11
Figura 2.3	Diagrama de Krumbein	14
Figura 2.4	Expansión térmica de diferentes tipos de arena	17
Figura 2.5	Proceso de soplado de corazones	23
Figura 2.6	Reacción del proceso fenólico-uretánico Cold Box	25
Figura 2.7	Corazón procesado por Shell	29
Figura 2.8	Almidón de maíz	31
Figura 2.9	Formación de emisiones en el proceso de vaciado usando corazones orgánicos (izquierda) y corazones inorgánicos (derecha)	34
Figura 2.10	Diagrama ternario a temperatura ambiente mostrando cambios de fase del silicato de sodio dependiendo del contenido de agua	36
Figura 2.11	Esquema del proceso de deshidratación del aglutinante base silicato	41
Figura 2.12	Modelo de la doble capa eléctrica y potencial zeta	45
Figura 2.13	Red de un aluminosilicato	48
Figura 2.14	Ejemplo de un enlace peptídico	50
Figura 2.15	Estructura de una molécula de almidón	51
Figura 2.16	Ejemplo de corazones de sal	52
Figura 2.17	Corazones de arena de sílice obtenidos por el proceso de caja fría	53
Figura 2.18	Equipo de recuperación térmica	59
Figura 2.19	Equipo de atrición	60
Figura 2.20	Granos de arena recubiertos con silicato de sodio	67
Figura 3.1	Proceso para pruebas de recuperación de la arena	

	recubierta con silicato de sodio	78
Figura 3.2	Arena de proceso que fue recuperada térmicamente	79
Figura 3.3	Equipo de tamización por vibrado Ro-tap	81
Figura 3.4	Estereoscopio Olympus SZH10	83
Figura 3.5	Microscopio óptico marca Keyence	84
Figura 3.6	Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6360LV	85
Figura 3.7	pH-metro Thermo Scientific Orion Star	86
Figura 3.8	Viscosímetro portátil Viscolite VL700	87
Figura 3.9	Espectrofotómetro de Infrarrojo por Transformada de Fourier Perkin Elmer Spectrum 100	88
Figura 3.10	Analizador Termogravimétrico 50 Shimadzu	89
Figura 3.11	Sopladora Redford de caja caliente para elaboración de probetas	91
Figura 3.12	Mezclador de arena – resina Hobart	92
Figura 3.13	Dimensiones de probeta tipo dog bone	93
Figura 3.14	Proceso de adición de aditivos ácidos a las mezclas de arena y silicato	97
Figura 3.15	Molino de mortero Retsch RM 200	99
Figura 3.16	Proceso de recuperación por atrición	101
Figura 3.17	Proceso de recuperación por lavado	103
Figura 3.18	Probetas de tensión	108
Figura 3.19	Máquina de tensión de probetas Thwing Albert	109
Figura 3.20	Cámara de humedad controlada ESPEC	110
Figura 3.21	Probeta de distorsión en caliente (ensayo BCIRA)	112
Figura 3.22	Equipo de distorsión en caliente BCIRA marca Simpson	112
Figura 3.23	Esquema de distorsión en caliente	114
Figura 4.1	Gráfica de la distribución granulométrica de la arena	118
Figura 4.2	Morfología de los granos de arena de proceso	119
Figura 4.3	Espectro de infrarrojo de la resina de caja fría parte 1	123
Figura 4.4	Espectro de infrarrojo de la resina de caja fría parte 2	123
Figura 4.5	Espectro de infrarrojo la solución de silicato de sodio	124

Figura 4.6	Análisis termogravimétricos de los aglutinantes orgánicos e inorgánicos	125
Figura 4.7	Porcentaje de pérdida en peso por rangos de temperatura para cada compuesto	126
Figura 4.8	Porcentaje remanente para cada compuesto	127
Figura 4.9	pH para diferentes porcentajes de arena con silicato (ARSS) con diferentes porcentajes de ácidos	129
Figura 4.10	Desarrollo de resistencia mecánica usando 25% de arena ARSS	131
Figura 4.11	Vida de banco usando 25% de arena ARSS	133
Figura 4.12	Desarrollo de resistencia usando 50% de arena RSS	134
Figura 4.13	Vida de banco usando 50% de arena RSS	136
Figura 4.14	Desarrollo de resistencia usando 75% de arena RSS	137
Figura 4.15	Vida de banco usando 75% de arena RSS	137
Figura 4.16	Porcentaje de finos formados a diferentes presiones y Arenas	140
Figura 4.17	AFS de las arenas a diferentes presiones	141
Figura 4.18	pH de la arena atricionada mecánicamente	144
Figura 4.19	Resultados de pH a diferentes tipos de ARSS, tiempos de agitación y ciclos de lavado con agua fría	147
Figura 4.20	Resultados de pH a diferentes tipos de ARSS, tiempos de agitación y ciclos de lavado con agua caliente	148
Figura 4.21	Resultados de pH a diferentes tipos de ARSS, tiempos de agitación y ciclos de lavado con HCl	149
Figura 4.22	Desarrollo de resistencia a diferentes condiciones de lavado, usando 75% de arena recubierta con silicato de sodio	151
Figura 4.23	Vida de banco a diferentes condiciones de lavado, usando 75% de arena recubierta con silicato de sodio	152
Figura 4.24	Desarrollo de resistencia a 30 y 90% de humedad	

	ambiental	156
Figura 4.25	Distorsión en caliente en función del tiempo para las diferentes muestras estudiadas; inorgánico recuperada (AIR) 1.0%, inorgánico y blanco 1.0%	159
Figura 4.26	Comparación del valor de distorsión máxima entre las muestras preparadas; inorgánico recuperada (AIR) 1.0%, inorgánico y blanco 1.0%	160
Figura 4.27	Comparación del tiempo de distorsión máxima para los diferentes muestras preparadas inorgánico recuperada (AIR) 1.0%, inorgánico y blanco 1.0%	161
Figura 4.28	Análisis del tiempo de fractura para las muestras preparadas; inorgánico recuperada (AIR) 1.0%, inorgánico y blanco 1.0%	161
Figura 5.1	Comparativo entre arena de proceso recuperada térmicamente (izquierda) y arena nueva (derecha)	164
Figura 5.2	Diagrama ternario a temperatura ambiente mostrando cambios de fase del silicato de sodio dependiendo del contenido de agua	165
Figura 5.3	Espectro FTIR para SiO ₂ y silicato de sodio	166
Figura 5.4	Estructura del fenol-formaldehído conteniendo estructuras base fósforo y formación de radicales libres	167
Figura 5.5	Desarrollo de resistencia a 1.0 horas usando 50% de arena RSS para los distintos ácidos	168
Figura 5.6	Degradación del uretano en medio ácido	169
Figura 5.7	Oxidación del fenol con ácido nítrico	169
Figura 5.8	Grano de arena sílice pasado por atrición mecánica	170
Figura 5.9	Capa de silicato de sodio fracturada presente sobre el grano de arena sílice	171
Figura 5.10	Espectro EDS que muestra el análisis químico de la capa de silicato de sodio en la superficie de un grano fracturado	172
Figura 5.11	Comparativo en gráfica de análisis químico elemental	

	de las diferentes muestras de arena	174
Figura 5.12	Comparativo de análisis químico elemental del sodio de las muestras de arena	175
Figura 5.13	Espectro EDS que muestra el análisis químico de la arena nueva	176
Figura 5.14	Espectro EDS que muestra el análisis químico de la arena recubierta con silicato de sodio	176
Figura 5.15	Espectro EDS que muestra el análisis químico de la arena del proceso inorgánico lavada con agua fría	177
Figura 5.16	Espectro EDS que muestra el análisis químico de la arena del proceso inorgánico lavada con HCl	177
Figura 5.17	Puente de aglutinante inorgánico afectado por la humedad ambiental	178
Figura 5.18	Granos de arena de proceso recuperada térmicamente	179
Figura 5.19	Granos de arena recubierta con silicato de sodio	180
Figura 5.20	Granos de arena inorgánica recuperada por lavado con HCl 0.5N	180

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Composición química típica de la arena de sílice	13
Tabla 2.2	Historia de los procesos de aglutinación química	19
Tabla 2.3	Sistemas de aglutinación química en base a su mecanismo catalizador	20
Tabla 2.4	Sistemas de aglutinación química en base a su mecanismo físico de curado	21
Tabla 3.1	Relación entre tamaño de apertura y número de malla	82
Tabla 3.2	Ácidos usados en la recuperación química	95
Tabla 3.3	Diseño de pruebas para el uso de ácidos en la arena recubierta con silicato de sodio	96
Tabla 3.4	Diseño de pruebas sin uso de ácidos	97
Tabla 3.5	Diseño de pruebas para recuperación mecánica	100
Tabla 3.6	Calidad química del agua	103
Tabla 3.7	Diseño de pruebas para recuperación húmeda	104
Tabla 3.8	Materiales a usar para la fabricación de probetas por caja fría	107
Tabla 4.1	Distribución granulométrica de la arena de proceso recuperada térmicamente	117
Tabla 4.2	Composición química y propiedades de arena nueva y arena de proceso	120
Tabla 4.3	Valores de viscosidad, pH y contenido de sólidos del silicato de sodio	121
Tabla 4.4	Pérdida de peso de los aglutinantes según el rango de temperatura $[(\Delta W/W)*100]$	126
Tabla 4.5	pH para diferentes porcentajes de arena con silicato (ARSS) con diferentes porcentajes de ácidos	128

Tabla 4.6	Porcentaje de ácido a usar de cada ácido para la fabricación de probetas de caja fría	130
Tabla 4.7	Desarrollo de resistencia mecánica usando 25% de arena ARSS	132
Tabla 4.8	Vida de banco usando 25% de arena ARSS	133
Tabla 4.9	Desarrollo de resistencia usando 50% de arena ARSS	135
Tabla 4.10	Vida de banco usando 50% de arena ARSS	136
Tabla 4.11	Desarrollo de resistencia usando 75% de arena ARSS	138
Tabla 4.12	Vida de banco usando 75% de arena ARSS	138
Tabla 4.13	AFS y porcentaje de finos formados a diferentes presiones y arenas	142
Tabla 4.14	Análisis de AFS y % de finos para la muestra con 5 de presión, 5 minutos y usando arena al 75%	143
Tabla 4.15	Resultados de pH por condición de lavado, % de arena recubierta con silicato de sodio (ARSS) y tiempo de lavado	146
Tabla 4.16	Resultados de desarrollo de resistencia a diferentes condiciones de lavado, usando 75% de arena recubierta con silicato de sodio	151
Tabla 4.17	Resultados de vida de banco a diferentes condiciones de lavado, usando 75% de arena recubierta con silicato de sodio	152
Tabla 4.18	Comparativo de resultados de pH y propiedades mecánicas de las probetas tratadas por recuperación química, mecánica y acuosa a diferentes condiciones	154
Tabla 4.19	Tipos de pruebas y sus porcentajes de arena y resina/aglutinante	155
Tabla 4.20	Tabla 4.20 Distorsión en caliente (mm) para cada condición	158

Tabla 4.21	Tabla 4.21 Desarrollo de resistencia a 30 y 90% de humedad ambiental	159
Tabla 5.1	Comparativo de análisis químico elemental de las diferentes muestras de arena	173

APÉNDICE A

Análisis estadísticos de ensayos mecánicos

❖ Desarrollo de resistencia

- $t = 0.0$ h

One-way ANOVA: 0.0 versus Condición

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se propuso igualdad de varianzas para el análisis.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Condición	2	0.8125	0.40627	32.90	0.000
Error	15	0.1852	0.01235		
Total	17	0.9978			

Resumen del modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.111121	81.44%	78.96%	73.27%

Medias

Condición	N	Media	StDev	95% CI
AIR 1.0%	6	1.3800	0.1062	(1.2833, 1.4767)
Blanco 1.0%	6	1.4333	0.1302	(1.3366, 1.5300)
Inorgánico	6	0.9583	0.0939	(0.8616, 1.0550)

StDev agrupada = 0.111121

Comparaciones en parejas de Tukey

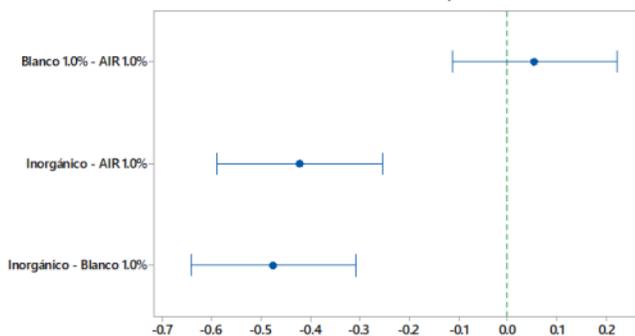
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Condición	N	Media	Agrupación
Blanco 1.0%	6	1.4333	A
AIR 1.0%	6	1.3800	A
Inorgánico	6	0.9583	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey

Diferencia de medias para 0.0



❖ Desarrollo de resistencia

- $t = 2.0$ h

One-way ANOVA: 2.0 versus Condición

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se propuso igualdad de varianzas para el análisis.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Condición	2	1.0561	0.52807	24.64	0.000
Error	15	0.3214	0.02143		
Total	17	1.3776			

Resumen del modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.146382	76.67%	73.56%	66.40%

Medias

Condición	N	Media	StDev	95% CI
AIR 1.0%	6	1.8400	0.1463	(1.7126, 1.9674)
Blanco 1.0%	6	1.9267	0.1007	(1.7993, 2.0540)
Inorgánico	6	2.3917	0.1809	(2.2643, 2.5190)

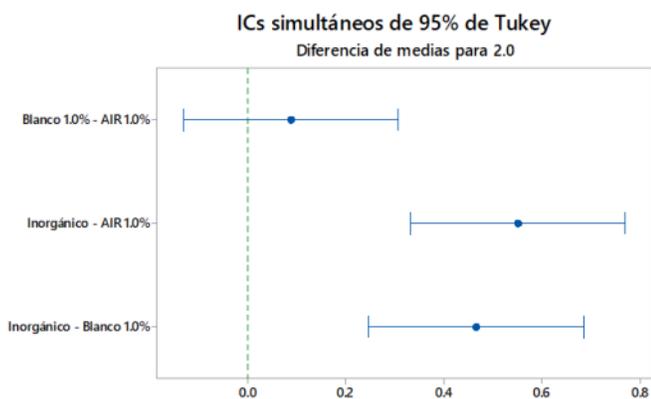
StDev agrupada = 0.146382

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Condición	N	Media	Agrupación
Inorgánico	6	2.3917	A
Blanco 1.0%	6	1.9267	B
AIR 1.0%	6	1.8400	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



❖ Desarrollo de resistencia

- $t = 2.0$ h

One-way ANOVA: 24.0 versus Condición

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se propuso igualdad de varianzas para el análisis.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Condición	2	1.9435	0.97176	52.65	0.000
Error	15	0.2769	0.01846		
Total	17	2.2204			

Resumen del modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.135859	87.53%	85.87%	82.04%

Medias

Condición	N	Media	StDev	95% CI
AIR 1.0%	6	1.7733	0.1735	(1.6551, 1.8916)
Blanco 1.0%	6	1.8000	0.1006	(1.6818, 1.9182)
Inorgánico	6	2.4833	0.1231	(2.3651, 2.6016)

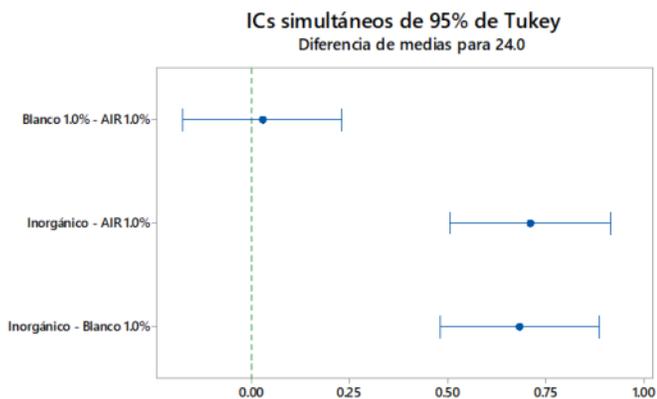
StDev agrupada = 0.135859

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Condición	N	Media	Agrupación
Inorgánico	6	2.4833	A
Blanco 1.0%	6	1.8000	B
AIR 1.0%	6	1.7733	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



❖ Desarrollo de resistencia a cámara húmeda

- $t = 2.0$ h CH

One-way ANOVA: 2.0 CH versus Condición

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se propuso igualdad de varianzas para el análisis.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Condición	2	0.8924	0.44621	10.42	0.001
Error	15	0.6424	0.04283		
Total	17	1.5348			

Resumen del modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.206949	58.14%	52.56%	39.73%

Medias

Condición	N	Media	StDev	95% CI
AIR 1.0%	6	1.4400	0.0687	(1.2599, 1.6201)
Blanco 1.0%	6	1.633	0.338	(1.4530, 1.813)
Inorgánico	6	1.9783	0.0981	(1.7983, 2.1584)

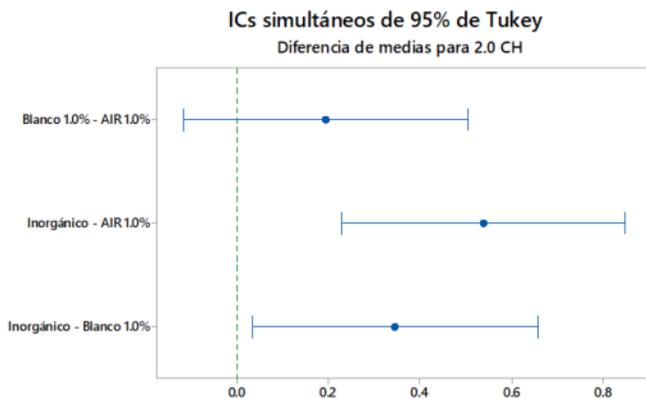
StDev agrupada = 0.206949

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Condición	N	Media	Agrupación
Inorgánico	6	1.9783	A
Blanco 1.0%	6	1.633	B
AIR 1.0%	6	1.4400	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



❖ Desarrollo de resistencia a cámara húmeda

- t = 24.0 h CH

One-way ANOVA: 24.0 CH versus Condición

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se propuso igualdad de varianzas para el análisis.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Condición	2	1.8314	0.91571	58.30	0.000
Error	15	0.2356	0.01571		
Total	17	2.0670			

Resumen del modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.125331	88.60%	87.08%	83.59%

Medias

Condición	N	Media	StDev	95% CI
AIR 1.0%	6	1.0200	0.0879	(0.9109, 1.1291)
Blanco 1.0%	6	1.2233	0.1483	(1.1143, 1.3324)
Inorgánico	6	0.4683	0.1320	(0.3593, 0.5774)

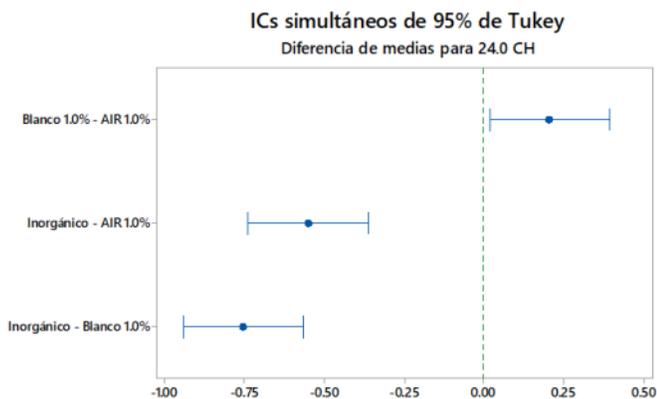
StDev agrupada = 0.125331

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Condición	N	Media	Agrupación
Blanco 1.0%	6	1.2233	A
AIR 1.0%	6	1.0200	B
Inorgánico	6	0.4683	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



APÉNDICE B

Análisis estadístico de la distorsión en caliente

❖ Distorsión máxima

One-way ANOVA: Distorsión máxima versus Proceso

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se propuso igualdad de varianzas para el análisis.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Proceso	2	0.10780	0.053899	22.91	0.000
Error	15	0.03529	0.002353		
Total	17	0.14309			

Resumen del modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0485062	75.34%	72.05%	64.48%

Medias

Proceso	N	Media	StDev	95% CI
AIR 1.0%	6	0.5348	0.0396	(0.4926, 0.5770)
BLANCO 1.0%	6	0.4417	0.0623	(0.3995, 0.4839)
INORGÁNICO	6	0.3453	0.0402	(0.3031, 0.3875)

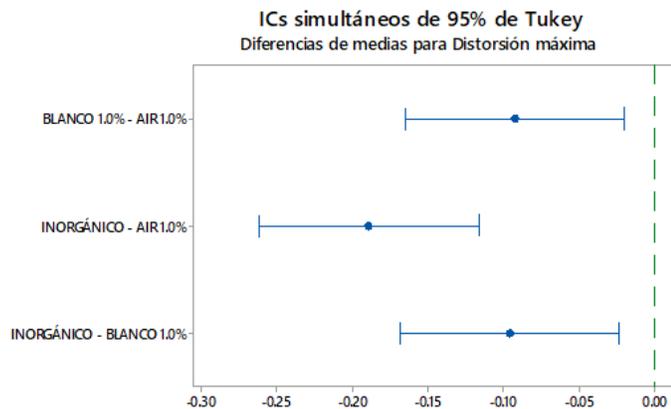
StDev agrupada = 0.0485062

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Proceso	N	Media	Agrupación
AIR 1.0%	6	0.5348	A
BLANCO 1.0%	6	0.4417	B
INORGÁNICO	6	0.3453	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



❖ Tiempo de Distorsión máxima

One-way ANOVA: Tiempo de distorsión máxima versus Proceso

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se propuso igualdad de varianzas para el análisis.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Proceso	2	6.333	3.167	1.69	0.218
Error	15	28.167	1.878		
Total	17	34.500			

Resumen del modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.370320	18.36%	7.47%	0.00%

Medias

Proceso	N	Media	StDev	95% CI
AIR 1.0%	6	6.667	1.751	(5.474, 7.859)
BLANCO 1.0%	6	7.833	1.472	(6.641, 9.026)
INORGÁNICO	6	8.000	0.632	(6.808, 9.192)

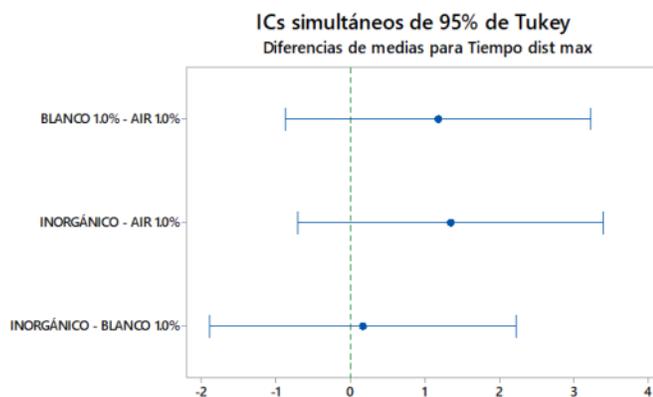
StDev agrupada = 1.37032

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Proceso	N	Media	Agrupación
INORGÁNICO	6	8.000	A
BLANCO 1.0%	6	7.833	A
AIR 1.0%	6	6.667	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



❖ Tiempo de Fractura

One-way ANOVA: Tiempo de fractura versus Proceso

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se propuso igualdad de varianzas para el análisis.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Proceso	2	72.44	36.222	4.88	0.023
Error	15	111.33	7.422		
Total	17	183.78			

Resumen del modelo

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.72438	39.42%	31.34%	12.76%

Medias

Proceso	N	Media	StDev	95% CI
AIR 1.0%	6	21.000	1.789	(18.629, 23.371)
BLANCO 1.0%	6	22.00	2.61	(19.63, 24.37)
INORGÁNICO	6	25.67	3.50	(23.30, 28.04)

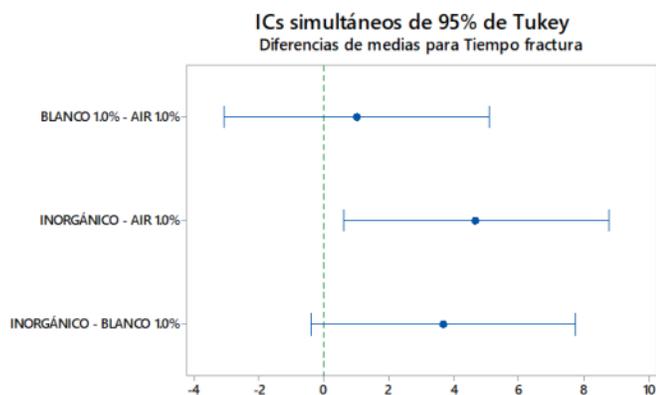
StDev agrupada = 2.72438

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Proceso	N	Media	Agrupación
INORGÁNICO	6	25.67	A
BLANCO 1.0%	6	22.00	A B
AIR 1.0%	6	21.000	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Aldo Alberto Sáenz Valdez

Candidato al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales

Nacido en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, el M.C. Aldo Alberto Sáenz Valdez es hijo del Lic. Jaime Sáenz Rangel y de la Sra. Alma Rosa Valdez Rodríguez. Cursó sus estudios de licenciatura en la Universidad Autónoma de Nuevo León y obtuvo el grado de Químico Industrial en el año 2006.

En el año de 2008 inicia sus estudios de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales en la Universidad Autónoma de Nuevo León, trabajando en el área de la fundición, obteniendo el grado en el año 2010, con el trabajo de tesis titulado “Desarrollo de un aglutinante inorgánico para la producción de corazones de arena en la industria automotriz”.

Cuenta con la siguiente publicación científica: “Development of inorganic binders for the manufacture of sand cores used in the automotive casting industry” y con la patente: “Method and composition of binder for manufacturing sand molds and/or cores for foundries” WO2010080583A1.

El M.C. Aldo Sáenz ha sido parte del grupo de trabajo de Investigación y Desarrollo de la empresa Nematik desde el año 2009 hasta en la actualidad en el área de corazones y arenas de fundición.