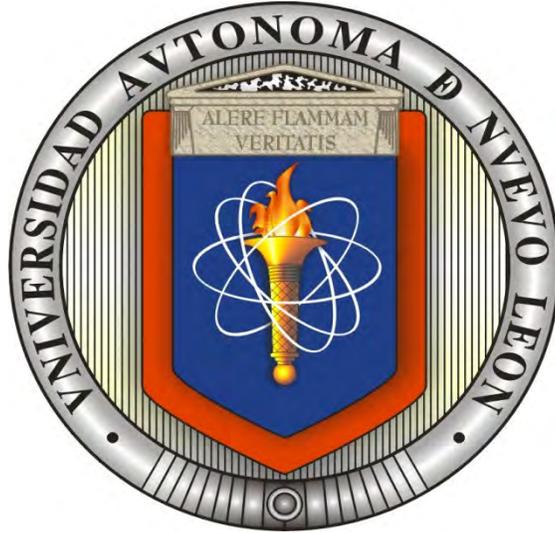


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE LA ARENA DE FUNDICIÓN AUTOMOTRIZ
PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
SUSTENTABLES**

POR

GILBERTO NOCHEBUENA REYES

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción.**

SEPTIEMBRE DEL 2010



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de Estudios de posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo

Estimado Dr. Valdez Tamez:

Por este medio le comunico, que el ING. CIVIL **GILBERTO NOCHEBUENA REYES**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis titulado "**ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE LA ARENA DE FUNDICIÓN AUTOMOTRIZ PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE**", por lo que no tengo inconveniente en solicitarle que amablemente gire las instrucciones necesarias para dar paso a los trámites correspondientes para atender la solicitud de Examen de Grado del Ing. Nochebuena Reyes con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra Institución.

Agradeciendo de antemano la atención brindada a la presente, me es grato despedirme, quedando a sus apreciables ordenes.

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Monterrey, N.L., a 27 de Agosto del 2010

Dr. Javier Rodrigo González López.
Director de Tesis



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

Dr. Pedro L. valdez Tamez
Subdirector de Estudios de posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León

Estimado Dr. Valdez Tamez.

En atención al oficio en el que se me informa que fui designado evaluador de la tesis: **"ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE LA ARENA DE FUNDICIÓN AUTOMOTRIZ PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE"**, que presenta el Ing. Gilberto Nochebuena Reyes, como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, me encuentro a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere usted pertinente.

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Monterrey, N.L., a 26 de Agosto del 2010

Dr. Javier Rodrigo González López.
Profesor Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por este conducto se **APRUEBA** la tesis “**Estudio de la utilización de la arena de fundición automotriz para el desarrollo de materiales de construcción sustentables**”, que presenta el Ing. **Gilberto Nochebuena Reyes**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, lo anterior después de ver leído, evaluado y constatado la calidad y los cambios sugeridos a la tesis.

Se extiende la presente para los fines que al interesado convengan.

ATENTAMENTE
“**ALERE FLAMMAM VERITATIS**”
cd. Universitaria, a 26 de agosto de 2010.

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Evaluador de Tesis



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902
www.ingenieriacivil.uanl.mx

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León

Estimado Dr. Valdez Tamez.

En atención al oficio en el que se me informa que fui designado evaluador de la tesis: "**ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE LA ARENA DE FUNDICIÓN AUTOMOTRIZ PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLES**", que presenta el Ing. Gilberto Nochebuena Reyes, como requisito para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, me encuentro a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere usted pertinente.

Atentamente

Monterrey, N.L., a 26 de Agosto del 2010



Dr. Abraham Velasco Téllez.
Evaluador externo



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Oficio: SDEPI 309-10

ING. LÁZARO VARGAS GUERRA

Director del Departamento de Escolar y de
Archivo de la UANL
PRESENTE.-

Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que el Ing. **Gilberto Nochebuena Reyes**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución.

De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se de el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,
"ALERE FLAMAM VERITATIS"
Cd. Universitaria a 27 de agosto del 2010

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



SUB DIRECCION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION

C.c.p. Archivo.
*jsf



Cd. Universitaria S/N, Apdo. Postal No. 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels y Fax: (81) 8376 3970, 8332 1902
www.ingenieriacivil.uanl.mx

Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a mis padres: **Hermelindo Nochebuena Hdez.** y a mi madre **Belén Reyes de León**, que sacrificaron muchas cosas y que confiaron en mí dándome una oportunidad de seguir preparándome para que el día de hoy, yo pueda estar cumpliendo esta meta. Padre quiero que sepas que gracias a ti he logrado esta meta y la he cumplido, tú has sido un ejemplo para mí durante todos estos años ya que para mi tu eres el mejor padre y amigo que he tenido; madre te doy las gracias por haberme dado la vida y cariño durante todo este tiempo, te quiero mucho tu también has sido un ejemplo para mí en mi vida, me has guiado por el camino correcto. Espero haber correspondido en algo a todo lo que han hecho por mí, quiero decirles que siempre valore el sacrificio y esfuerzo que emplearon en mí.

A mi madre

Belén Reyes de León

Por darme vida, apoyo y confianza siempre

A mi padre

Hermelindo Nochebuena Hernández

Por su apoyo incondicional

A mi hermana

Lourdes Nochebuena Reyes

Por su cariño y amor

A mi hermano

Marcos A. Nochebuena Reyes

Por su apoyo constante

A mis amigos

Por su amistad incondicional

A todos los compañeros y personas que confiaron en mi

Por todo, eternamente gracias

Agradecimientos

Al la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) y al Instituto de Ingeniería Civil (IIC) de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por permitirme estar en sus aulas y otorgarme las facilidades económicas e infraestructura otorgadas para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Javier Rodrigo González López, asesor de mi tesis, por toda su paciencia, asesoría, consejos, su enorme disposición y apoyo para poder terminar esta tesis, por su compromiso con la educación e investigación que es sin duda gran inspiración para muchos estudiantes.

A mis Co-asesores, los Doctores Pedro Leobardo Valdez Tamez y Abraham Velasco Téllez, por toda su ayuda, confianza y paciencia, que me permitieron llegar al término de este proyecto.

Al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP /103.5/08/3125/ y PROMEP/103.5/09/4822), por el apoyo económico, de materiales y equipo recibidos para la realización de esta investigación.

A la empresa NEMAK por haberme recibido y facilitado todas las condiciones para la completa elaboración del presente trabajo. A todo su personal del CDT. Al departamento de investigación y desarrollo.

Al Dr. José Talamantes Silva y al Dr. Abraham Velasco por ser siempre tan atento y cortés, y por confiar también en el presente proyecto.

A mis amigos del departamento de investigación y desarrollo: Efrén, Gilberto, Juan Pablo, David, Mario, Marcos, Miguel, Alejandro, Fernando, Andrés, Alberto, Moisés, Aldo. Por generar un ambiente de trabajo siempre de buen humor, ameno y de solidaridad. Gracias por su ayuda, solo así fue posible la realización de este proyecto de Maestría. Agradezco de manera especial a mi amigo Efrén, quien me brindo un especial apoyo a pesar de estar saturado con sus respectivas responsabilidades. Gracias a todos por su comprensión en mis tiempos difíciles.

Al Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil “Dr. Raymundo Rivera Villarreal” de la U.A.N.L., especialmente al Dr. Alejandro Durán Herrera, por toda su ayuda y apoyo, así como a los técnicos y personal administrativo de dicho departamento por todas las facilidades brindadas para el uso de equipo e instalaciones.

Al Dr. Gerardo Fajardo San Miguel, jefe del Laboratorio de Investigación de Materiales de la Construcción y a todo su personal por brindarme todas las facilidades durante los ensayos de los materiales preparados en este trabajo.

Al igual que al Departamento de Estructuras y Materiales de Construcción del IIC, en especial al Ing. José Román Villa Bárcenas, por su ayuda y apoyo para realizar esta investigación, así como al personal de dicho departamento.

A mis papas, por todo el apoyo y cariño brindado durante mi vida y durante la realización de la tesis.

A mis hermanos, gracias por confiar en mí y por brindarme el cariño y su apoyo incondicional durante todos estos años.

A mis abuelas, por creer siempre en mí, por su cariño y afecto, no hay nada que no haría yo por ustedes.

A mis compañeros y amigos de la Maestría: Alejandro Herrera, Raúl Trujillo, Rodolfo Román y Milton Torres. A mis compañeros de trabajo: Eva E. Gonzáles, Ernesto Posadas y a todas las personas que contribuyeron de una forma u otra en la realización de esta investigación.

Con todo mi afecto y cariño:

Gilberto Nochebuena Reyes.

Tabla de contenidos

	Página
• Portada	i
• Dedicatoria	ii
• Agradecimientos	iii
• Tabla de contenidos	vii
• Resumen	xi
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Introducción a la arena de fundición.	2
1.2 Arena de fundición gastada.	5
1.3 Recuperación de arenas	7
1.3.1 Recuperación de las arenas vía húmeda.	7
1.3.2 Recuperación mecánica.	9
1.3.3 Recuperación neumática.	10
1.3.4 Recuperación térmica.	11
1.4 Propiedades físico-químicas requeridas en las arenas recuperadas térmicamente.	13
1.5 Proceso de generación de la arena gastada.	14
1.6 Perspectiva nacional de la industria de fundición.	16
1.7 Impacto ecológico de la industria de fundición en el medio ambiente.	17
1.8 Sustentabilidad y alternativas para la construcción.	19
1.9 Planteamiento del problema.	22
1.10 Justificación del problema.	24
1.11 Hipótesis.	24
1.12 Objetivos del problema.	25
1.13 Alcances del trabajo de tesis.	25

	Capítulo II. Clasificación de las arenas de fundición y su comportamiento al usarlo en la producción de materiales de construcción.	26
2.1	Tipos de arena de fundición.	27
2.1.1	Arena Olivina.	28
2.1.2	Arena Cromita.	29
2.1.3	Arena Zircona.	30
2.1.4	Arena sintética.	31
2.1.5	Arena de sílice.	33
2.2	Propiedades de la arena de sílice y de la arena de fundición.	34
2.2.1	Composición química de la arena de sílice.	34
2.2.2	Características físicas de la arena de sílice.	35
2.2.2.1	Granulometría de la arena de sílice.	35
2.2.2.2	Forma de grano.	36
2.3	Características físicas de la arena gastada.	38
2.3.1	Composición química de la arena gastada (greña).	38
2.3.2	Granulometría de la arena gastada (greña).	39
2.3.3	Propiedades físicas y mecánicas de la arena gastada.	40
2.3.3.1	Valor de la demanda ácida (ADV).	41
2.3.3.2	Perdidas por ignición (L.O.I).	41
2.4	Reciclaje de la arena de fundición de manera sustentable para la fabricación de materiales de construcción.	42
2.5	Medidas para la gestión sustentable de la arena de fundición gastada.	42
	Capítulo III. Uso de la arena de fundición gastada en la producción de materiales de construcción.	44
3.1	Antecedentes en la aplicación de la arena de fundición.	45
3.2	Uso de la arena de fundición.	48
3.2.1	Uso de la arena de fundición gastada en terraplenes.	48

3.2.2	Uso de la arena de fundición gastada en concreto Pórtland hidráulico.	49
3.2.3	Uso de la arena de fundición gastada en lechadas y morteros.	51
3.2.4	Uso de la arena de fundición gastada en el mezclado de asfalto caliente.	52
3.2.5	Uso de la arena de fundición gastada en terraplenes fluidos.	54
3.2.6	Uso de la arena de fundición gastada en la agricultura.	55
3.2.7	Uso de la arena de fundición gastada como material de tracción en la nieve y/o hielo.	56
3.2.8	Uso de la arena de fundición gastada como material de fusión.	56
3.2.9	Uso de la arena de fundición gastada como material de fabricación de lana mineral	57
3.2.10	Uso de la arena de fundición gastada en la fabricación de la fibra de vidrio.	57
3.3	Uso de los materiales de construcción como subproductos de la industria de fundición con arena gastada.	57
	Capítulo IV. Cemento Pórtland.	59
4.1	Origen del cemento Pórtland.	60
4.2	Proceso de producción del cemento Pórtland.	60
4.3	Composición química del cemento Pórtland.	64
4.4	Hidratación del cemento Pórtland.	69
	Capítulo V. Metodología experimental.	71
5.1	Infraestructura empleada.	72
5.2.	Metodología experimental.	73
5.2.1.	Etapa 1: Obtención y preparación de los materiales.	77
5.2.1.1.	Descripción de los materiales.	77
5.2.1.2	Material Cementante.	77
5.2.1.3	Agregados.	78
5.2.2.	Etapa 2: Caracterización de los materiales.	81
5.2.2.1	Caracterización del material cementante CPO 40.	81

5.2.2.2	Densidad.	81
5.2.2.3	Análisis químico.	82
5.2.2.4	Pérdida por Ignición (L.O.I).	85
5.2.2.5	Fases minerales.	86
5.2.2.6	Tamaños de las partículas.	87
5.2.2.7	Área superficial específica.	88
5.2.2.8	Observación morfológica	88
5.2.2.9	Agregados estándar.	89
5.2.2.10	Densidad y porcentaje de absorción de agua.	90
5.2.2.11	Análisis granulométrico.	90
5.2.2.12	Procedimiento para la fabricación de especímenes de mortero.	90
5.2.2.13	Pesaje de materiales.	91
5.2.2.14	Homogenización de los cementantes.	92
5.2.2.15	Preparación del equipo de mezclado.	92
5.2.2.16	Mezclado del mortero.	93
5.2.2.17	Vaciado del mortero.	93
5.2.2.18	Transporte y curado de la pieza.	94
5.2.3	Etapa 3: Fabricación del mortero de referencia.	95
5.2.4	Etapa 4: Fabricación del mortero experimental.	97
5.2.5	Etapa 5: Selección del mortero experimental definitivo	97
5.2.6	Etapa 6: Evaluación del mortero en pruebas de estado fresco y endurecido.	98
5.2.6.1	Propiedades en estado fresco.	98
5.2.6.1.1	Prueba del contenido de aire del mortero.	98
5.2.6.1.2	Prueba de fluidez del mortero.	99
5.2.6.1.3	Prueba del tiempo de fraguado por penetración.	100
5.2.6.1.4	Prueba del análisis térmico semi-adiabático del mortero.	101
5.2.6.1.5	Prueba de expansión del mortero.	103
5.2.6.2	Propiedades en estado endurecido.	104
5.2.6.2.1	Prueba de resistencia a compresión.	104

5.2.6.2.2	Prueba de expansión del mortero endurecido.	105
5.2.6.2.3	Microscopía electrónica de barrido (MEB) SEM.	106
	Capítulo VI. Discusión y análisis de los resultados.	108
6.1	Introducción al análisis de resultados.	109
6.2	Densidad de los materiales.	110
6.3	Distribución de tamaño de partícula del cemento Pórtland.	111
6.4	Composición química del Cemento Pórtland.	112
6.5	Compuestos potenciales del cemento Pórtland.	113
6.6	Requerimientos físicos del cemento Pórtland.	114
6.7	Composición química de las arenas gastadas.	115
6.7.1	Composición química de la arena gastada en greña.	115
6.7.2	Composición química de la arena gastada retenida en malla #100.	116
6.7.3	Composición química de la arena gastada retenida en malla #200.	117
6.8	Análisis de fases minerales por DRX del cemento Pórtland.	119
6.9	Fases mineralógicas del cemento Pórtland.	119
6.10	Análisis de fases minerales por DRX de las arenas gastadas.	120
6.11	Morfología por microscopía electrónica de barrido del cemento Pórtland.	122
6.12	Análisis granulométrico de las arenas gastadas.	123
6.13	Pérdida por ignición.	125
6.14	Contenido de aire del mortero de cemento hidráulico.	125
6.15	Fluidez de los morteros fabricados con arena gastada.	127
6.16	Tiempo de fraguado.	128
6.17	Resultados de pruebas exploratorias para el diseño de mortero de prueba.	133
6.18	Resultados de la resistencia a compresión del mortero experimental definitivo.	135

6.19	Resultado del análisis térmico semi-adiabático del mortero fabricado con arena gastada.	137
6.20	Expansión del mortero fabricado con arena gastada.	138
6.21	Microscopía electrónica de barrido SEM del mortero experimental definitivo.	140
	Capítulo VII. Conclusiones y recomendaciones.	153
7.1	Conclusiones.	154
7.2	Recomendaciones	155
	Referencias Bibliográficas	157
	Glosario de términos	163

Resumen

Gilberto Nochebuena Reyes **Fecha de Graduación: Septiembre 2010,**
Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

**Título de Estudio: “ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE LA ARENA DE
FUNDICIÓN AUTOMOTRIZ PARA EL DESARROLLO DE
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLES”**

Número de páginas. 166

**Candidato para el Grado de Maestría
en Ciencias con Orientación en
Materiales de Construcción.**

Área de Estudio: Ingeniería Civil

Propósito y Método de Estudio:

Hoy en día el avance tecnológico ha evolucionado vertiginosamente en los últimos años ha conducido al desarrollo innovador de muy diversos productos fundidos de los cuales, se demanda una alta calidad de las materias primas para la fabricación de moldes, en los cuales requieren grandes cantidades de arena que, junto a otros aditivos, constituyen los moldes en los cuales se vierte el metal fundido. Una vez que el metal ha solidificado, estos moldes son destruidos para obtener las piezas por medio de un proceso mecánico. Debido a las condiciones de trabajo de los moldes después de un cierto número de usos se genera la denominada arena gastada la cual es considerada como un subproducto del proceso.

Las arenas de moldeo usadas por las industrias de fundición son el principal residuo generado en este tipo de actividad, parte de las arenas que se generan en el proceso, son recuperadas y reutilizadas. El proceso de recuperación de arena produce disminución de las propiedades de la misma conforme se somete a esfuerzos mecánicos y térmicos, dando como resultado

agrietamiento, reduciendo el tamaño de las partículas a un punto donde no se puede utilizar como medio para formar moldes fundidos. No obstante, un importante volumen de estas no es recuperado y estas arenas son finalmente acumuladas en grandes bancos. Debido a la acumulación de la arena de desecho se optó por desarrollar un proyecto que abordara este problema y permitiera reutilizar la arena de fundición como un agregado en los materiales de construcción de manera sustentable y económica.

Considerando la alta tasa de producción en este tipo de mercado, se pretende aportar posibles soluciones factibles de reutilizar el subproducto de arena como una alternativa para crear un producto de valor agregado que contenga las características para aplicarlo dentro de los materiales de manera sustentable con un enfoque económico en la industria de la construcción.

Para este proyecto se decidió fabricar morteros con un cierto porcentaje de arena de sílice y arena gastada, debido al poco estudio realizado que se ha manifestado con la arena gastada en trabajos anteriores. La determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento Pórtland se obtuvo mediante la fabricación de cubos de 5 cm. Se optó por analizar micro estructuralmente los morteros que manifestaban una reacción de calor de hidratación durante la mezcla, esto como consecuencia acarrea la formación de una expansión en el mortero, la formación de poros y por consiguiente se obtenían bajas resistencias a compresión.

Los especímenes fueron curados de forma estándar a 23 ± 2 °C, y ensayados a las edades de **1, 3, 7, 14 y 28 días**.

Es factible reutilizar la arena gastada, lo cual beneficia en términos económicos a la industria de la construcción y reduce el posible impacto de su inadecuada disposición.

CAPÍTULO I



INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción a la arena de fundición.

Las arenas de fundición son el principal residuo generado por las industrias de fundición de metales tanto ferrosos como no ferrosos. Estas arenas son utilizadas para la elaboración de moldes que copian la figura de un modelo o pieza a replicar en el metal que se requiera.

Los moldes en arena son elaborados mayormente en dos mitades que reproducen el modelo a replicar. Una vez conformado el molde se extrae el modelo quedando un vacío en el molde. Este vacío conformará la pieza cuando se vierta el metal al molde en el proceso de colado.

Una vez que el metal en estado de fusión se ha incorporado al molde y se ha solidificado, es necesario extraer la pieza que se ha replicado. Para ello, se requiere colapsar el molde de arena de fundición. En el proceso repetitivo de esta etapa del proceso productivo, conocida como desmoldeo, las arenas de fundición se transforman en un residuo y son llamadas arenas gastadas.

Esta breve reseña del proceso productivo nos describe el uso de las arenas de fundición y como éstas se transforman en residuo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las industrias de fundición de metales pueden poseer un tamaño variable, diferentes características y volúmenes de generación de residuos y diferentes tecnologías de proceso.

El avance tecnológico ha evolucionado en los últimos años lo que ha conducido al desarrollo innovador de los diferentes factores de proceso y piezas fabricadas, lo cual demanda alta calidad de sus componentes para la fabricación de moldes como se presentan en la **figura 1**.



Figura 1. Obtención de cabezas y monobloques de arena de sílice

Estos moldes utilizan grandes cantidades de arena que, junto a otros aditivos, constituyen los moldes en los cuales se vierte el metal fundido. Una vez que el metal ha solidificado, estos moldes serán destruidos para obtener las piezas por medio de un proceso termo-mecánico, bajo estas condiciones de trabajo se generan las arenas denominadas como gastadas.

Las arenas de moldeo usadas por las industrias de fundición son el principal residuo generado de este tipo de industrias, parte de las arenas que se generan en el proceso, son recuperadas y reutilizadas. El proceso de recuperación de arena produce disminución de las propiedades de la misma conforme se somete a esfuerzos mecánicos y térmicos, dando como resultado agrietamiento, reduciendo el tamaño de las partículas hasta un punto donde no se puede re-utilizar como medio para formar moldes para fundición.^[1]

Un importante volumen de arenas no es recuperado y estas son finalmente depositadas en grandes bancos de arena gastada. Debido al acopio de la arena gastada que se práctica en una empresa de la localidad se optó por desarrollar un proyecto que abordará este problema y permitirá reutilizar la arena de

fundición como un agregado en los materiales de construcción de manera sustentable y económica. Considerando la alta tasa de producción en este tipo de mercado, se pretende aportar posibles soluciones factibles de reutilizar el desperdicio de arena gastada como una alternativa para utilizarlo como un subproducto que contenga las características necesarias para su aplicación.

Para este proyecto se decidió fabricar morteros con un cierto porcentaje de arena de sílice y arena gastada, debido a que estudios anteriores se han centrado en la reutilización de arena gastada de la industria ferrosa y en este trabajo se está utilizando residuos de fundición de aluminio que influye de manera distinta en el desempeño de las mismas. La determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento Pórtland se obtuvo mediante la fabricación de cubos y se optó por analizar macro y micro estructuralmente los morteros. Es conocido que el aluminio dentro de un sistema cementante causa una reacción de calor inusual en la hidratación, esto como consecuencia acarrea la formación de una expansión en el mortero, la formación de poros, grietas y por consiguiente se obtendrían bajas resistencias a compresión.

Los especímenes fueron curados de forma estándar ASTM C 511-04^[62], a 23 ± 2 °C, y ensayados a edades de **1, 3, 7, 14 y 28 días**.

En el presente trabajo se describe la factibilidad de reutilizar la arena gastada, lo cual beneficia en términos económicos a la industria de la construcción y reduce el posible impacto de su inadecuada disposición por lo que se hace una breve descripción de los materiales a manera de introducción y de los objetivos del trabajo así como la hipótesis a seguir.

1.2 Arena de fundición gastada.

La industria de la fundición del sector automotriz, hoy en día enfrenta márgenes de utilidad cada vez menores. Si bien el costo tiene un papel muy importante al decidir qué tipo de proceso de fundición se debe de utilizar para la fabricación de los componentes, se deberán desarrollar propiedades físicas y mecánicas adecuadas para un correcto desempeño. Al hablar de los procesos de moldeo por unión química, se debe pensar en disminuir el consumo de resina y reutilizar la arena en gran medida. Cabe mencionar que en la industria de fundición, usando el proceso de moldeo por unión química, se produce un desperdicio de arena tal que puede llegar a alcanzar la cifra del 70% de su uso total. ^[2]

El objetivo principal para la industria de la fundición automotriz es producir piezas con mejor calidad. En la **figura 2** se presenta la calidad de la producción de piezas de moldeo y estas se traducen en buenas propiedades físicas y mecánicas así como también en un buen acabado superficial con un mejor rendimiento ^[3,4].

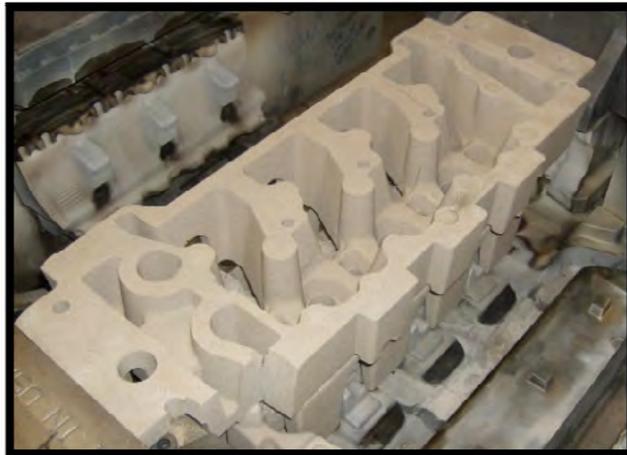


Figura 2. Aspecto de un molde para la producción de una cabeza de motor.

Los moldes y corazones de arena, representan los elementos más importantes en el proceso de vaciado de materiales. El buen comportamiento de los moldes y corazones es fundamental para una buena práctica de fundición. Muchos de los problemas, que originan rechazo en las piezas vaciadas, se deben a un mal procedimiento de moldeo que genera grandes cantidades de desperdicio, como los que se presentan en la **figura 3** ^[2].



Figura 3. Generación de desperdicio de moldes de corazones y monobloques

Cabe destacar que las propiedades físicas y químicas de la arena son muy importantes en términos de desarrollo de resistencia mecánica y vida de banco de la mezcla, arena-resina. La arena que se utiliza en la fabricación de los moldes de fundición, independientemente del proceso que se utilice, se va contaminando conforme transcurre el proceso al estar en contacto con el metal, el material aglutinante, arcillas, polvo y otros contaminantes. Esta arena con el tiempo va cambiando sus características químicas, físicas y mecánicas, de tal forma que inhiben la reacción de las resinas que cumplen con la función de unión de las mismas. En el caso de los sistemas que usan fenol-uretano, conlleva en muchas ocasiones a utilizar una cantidad mayor de reactivos que aunadas al incremento en la temperatura de calcinación (en el proceso de recuperación de arena vía térmica), disminuyen las propiedades de las arenas; dando como resultado defectos en moldes y corazones.

1.3 Recuperación de arenas.

El aumento en el costo de la arena nueva, limpia, seca y libre de arcilla en conjunto con las exigencias ambientales y de transporte, ha traído como consecuencia que la industria de la fundición, tenga la necesidad de someter a la arena a un proceso de recuperación, con el objetivo de maximizar su vida útil.

Después de utilizar la arena en el proceso de fundición se contamina con finos, cenizas, resina calcinada o simplemente se mezcla con mas arenas residuales de los moldes, mermando sus propiedades. Un aspecto de relevancia es el hecho de que la presencia de dichas impurezas reduce la temperatura de sinterización (ciclo térmico con temperatura y atmosfera controlada) y esto a su vez produce un mayor deterioro en los granos de arena con lo cual la vida útil decrece ^[5]. Entonces, podemos definir la recuperación de arenas como el tratamiento físico, térmico o químico de un agregado refractario, que permite su reúso sin tener pérdidas significativas en cuanto a sus propiedades originales ^[6].

1.3.1 Recuperación de las arenas vía húmeda.

El procesamiento para la recuperación de las arenas por el método húmedo es más apropiado para los procesos de moldeo que utilicen bentonita como aglutinantes. Los terrones de arena contaminada entran a una quebradora a través de la cual pasa una corriente de agua para formar lodo con arena. En esta etapa los trozos metálicos se separan y se llevan de regreso para ser fundidos. Los lodos se bombean a un clasificador primario cuya función es remover las partículas finas, lo anterior se aprecia en la **figura 4**. Dentro del clasificador primario los lodos entran al tanque de alimentación de la celda de atrición, en donde los lodos se filtran, aumentando el porcentaje de sólidos. La pesada carga baja hacia la celda de atrición en donde, la limpieza se realiza a

elevada velocidad mediante paletas resistentes a la abrasión, **(figura 5)**. El tiempo de resistencia de la arena en la celda está en función de la forma de grano, la cantidad y característica del material aglutinante y aditivos presentes. La arena pasa a un clasificador secundario cuya función es la de llevar a cabo la distribución de grano apropiada para la reutilización de la arena. De aquí, la arena es llevada a una operación de secado para finalmente ser cribada y usarse nuevamente.

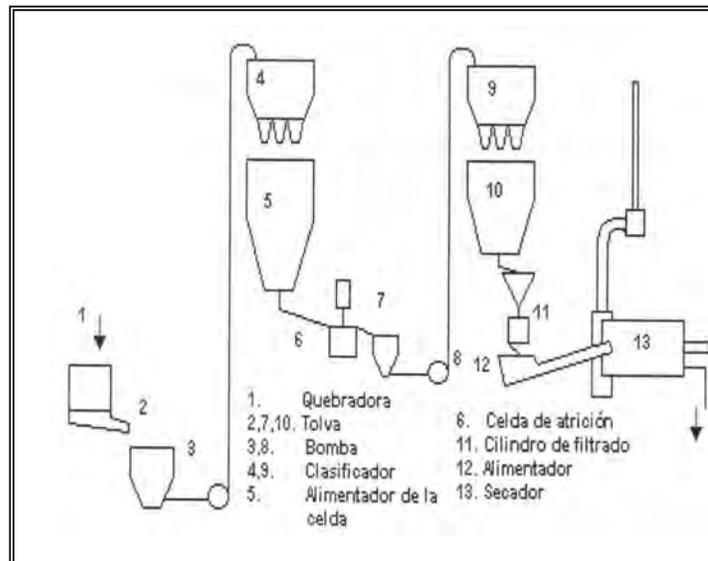


Figura 4. Sistema de recuperación de la arena vía húmeda.

Con el paso del tiempo se han desarrollado sistemas y técnicas de recuperación que permiten un mayor re uso de la arena, buscando con esto un mayor periodo de vida útil y una considerable disminución en los gastos de arena nueva adquirida para compensar las mermas.

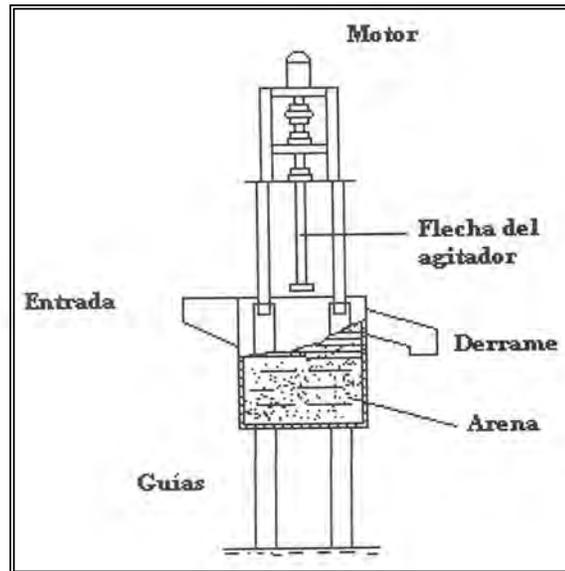


Figura 5. Celda de atrición

En el proceso de fundición para la obtención de una pieza se requiere, la preparación del metal líquido con la composición química, temperatura y limpieza adecuadas y la elaboración de moldes y corazones con forma, resistencia, precisión y acabados para resistir al metal fundido [7].

1.3.2 Recuperación mecánica.

La arena llega al sistema con una temperatura aproximada de 93 °C. Los terrones de arena formados durante el proceso son triturados en una quebradora de rodillos. La arena al salir de la quebradora, en su viaje por el sistema de vibración, va perdiendo tanto temperatura como humedad, debido al uso de un sistema de aireación. Esta arena entra después a la etapa de cribado en donde los finos al igual que la arcilla se separan reduciendo a su vez el índice de finura.

La arena entra al sistema de cribado con un índice de finura que va del 37 al 40 A.F.S de donde, el 5 ó 7 %, es material que pasa la malla # 70. Después del cribado, la arena tiene un índice de finura de entre el 32 y 35 A.F.S de donde, el 0.5 % del material, pasa a través de la malla # 70.

Existen unidades de atrición las cuales, rompen los terrones de arena a un tamaño reducido de grano y son lanzados a un sistema de abrasión para así, fracturar las capas adheridas a los granos. Subsecuentemente las etapas de remoción del polvo, finos y la clasificación, darán como consecuencia un bajo valor en las pérdidas por ignición de la arena. Este tipo de unidad recuperadora es probablemente el más apropiado para el proceso de silicato.

1.3.3 Recuperación neumática

La mayoría de este tipo de sistemas se basan en trituración de los terrones de arena. 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. En la **figura 6** se aprecia un esquema del sistema neumático. El choque entre los granos simula una tormenta de arenas en donde las películas adheridas a los granos son removidas. Normalmente, estos sistemas constan de discos abrasivos en donde la arena cae.

En estos sistemas la eficiencia calculada es del 75 %. Algunos sistemas tienen una capacidad de trabajo de 2 a 20 ton /h y son capaces de tratar todos los sistemas furánicos, fenólicos y uretánicos, además de los sistemas éster, éster - fenolicos y procesos CO₂.

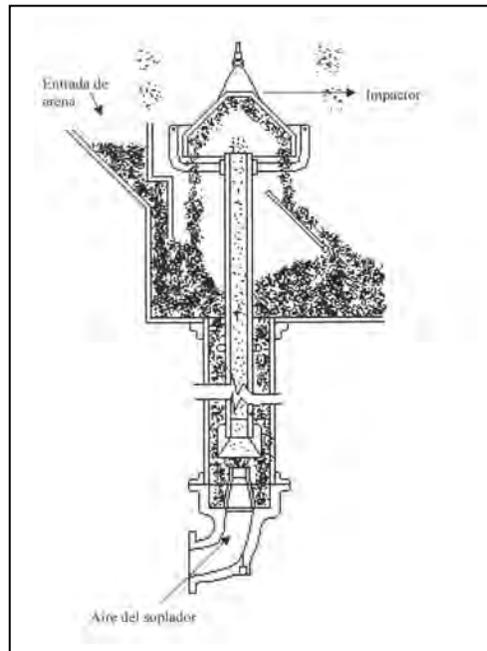


Figura 6. Equipo neumático de recuperación.

1.3.4 Recuperación térmica.

Este proceso trabaja con temperaturas que oscilan de 500 a 850 °C. Entre estas temperaturas se rompen los enlaces orgánicos de las capas de resina que recubren los granos de arena. Este tipo de recuperación es el más adecuado para los procesos orgánicos. El equipo utilizado para la calcinación puede ser de tres tipos: horno rotatorio, horno múltiple y lecho fluídizado.

La arena a recuperar se alimenta dentro del horno calentándola alrededor de 816 °C por un periodo no menor a 15 minutos ^[6]. La unidad de recuperación térmica consiste en una quebradora para triturar los terrones y un equipo de cribado para la separación del material metálico.

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 fluídizado en el cual, la abrasión dada

entre los granos ofrece una ayuda para el tratamiento. En la **figura 7** se presenta un calcinador de lecho fluídizado.

Este tipo de recuperación produce pocos humos, aún cuando se utiliza para remover películas de resina de espesor considerable. Si la arena de sílice a recuperar contiene apreciables cantidades de CaCO_3 , el incremento en el pH y ADV (demanda de ácido) en la arena es inevitable lo cual, constituye un gran problema para una nueva utilización de la misma.

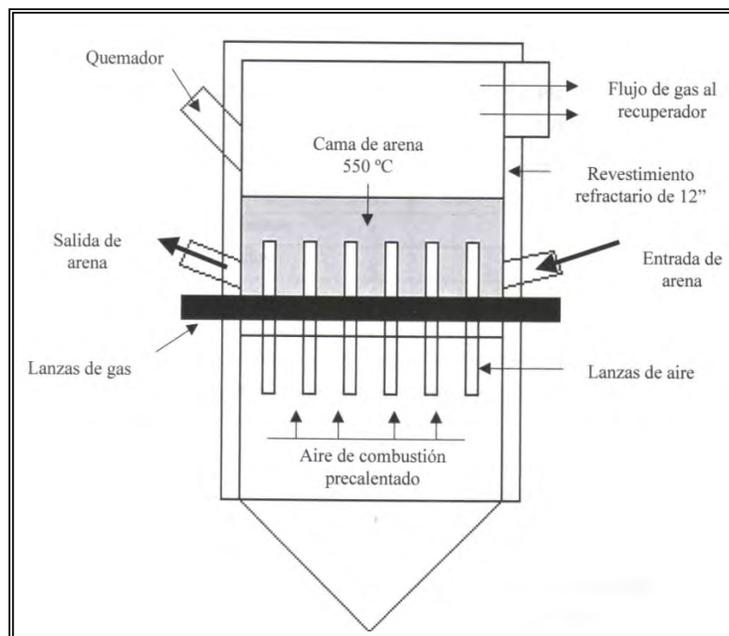


Figura 7. Calcinador de lecho fluídizado.

En la **figura 8** se presenta la formación de los moldes y cabezas de aluminio, lo cual da como consecuencia la formación de la arena gastada acumulada en grandes bancos de arena provocando un impacto ambiental en el ecosistema.



Figura 8. Cabezas de aluminio.

1.4 Propiedades físico-químicas requeridas en las arenas recuperadas térmicamente.

Existen varios parámetros que requieren ser monitoreados en el proceso de recuperación de arena, lo anterior debido a su impacto en el desempeño que la arena pueda tener en un próximo ciclo.

- a) L.O.I ó pérdida de ignición.

Este parámetro se controla mediante la temperatura de recuperación de los hornos.

- b) Granulometría ó número AFS (Sociedad Americana de Fundidores).

El análisis de la finura de grano además de proporcionar el tamaño promedio, también proporciona información acerca de la distribución de las partículas las cuales influyen de manera importante en las propiedades físicas de la arena, tales como resistencia, permeabilidad, tendencia a defectos por expansión de arena u otros factores.

La distribución de la arena se determina por el número de mallas que la conforman. Se dice que una arena es de 3 ó 4 mallas cuando el 10 % o más del retenido se encuentran en el tamiz correspondiente.

c) pH y demanda de ácido (ADV).

Estos parámetros miden la pureza química de la arena y son características que indican el grado de acidez o alcalinidad de la misma.

Una arena con carácter alcalino proporciona menor vida de banco a la mezcla de arena-resina debido a que los componentes alcalinos (CaO principalmente) neutralizan una porción de resina y demás aceleran drásticamente la reacción entre dos resinas ^[8].

La recuperación térmica a altas temperaturas (más de 550°C) genera componentes alcalinos como óxido de calcio (CaO), alúmina (Al₂O₃), etc. y que son acumulativos en cada ciclo de recuperación, además de los contaminantes provenientes de los ciclos de recuperación existen otros agregados por la arena a recuperar proveniente de los tratamientos térmicos, pueden ser partículas de aluminio, fierro y carbonato de calcio.

Un alto contenido de finos (malla # 270), proporcionará valores altos de pH y ADV debido a que en esta malla se concentra la arcilla, que es de naturaleza básica.

1.5 Proceso de generación de la arena gastada.

La industria automotriz es de los sectores industriales que más auge han otorgado al desarrollo tecnológico debido a las necesidades crecientes de un mercado extenso y muy competitivo. Desde décadas pasadas, lo referente a la fabricación de cabezas de motor, se han desarrollado nuevas tecnologías que

han llegado a un estado de conocimiento muy avanzado en la producción de esta pieza. Los materiales más utilizados para la fabricación de estas piezas son la arena y el aluminio. La industria de la fundición es un pilar básico del desarrollo mundial en conjunto con la industria automotriz, de construcción, transporte y otras más. Una industria de este tipo con clientes a nivel global tiene que llegar a altas tasas de producción y como consecuencia generan también una gran cantidad de desechos, en forma de gases, partículas y sólidos. Hoy en día, la exigencia del mercado se ha vuelto más complicada. Es necesario fabricar cabezas y monobloques de aluminio, que sean más ligeros lo que es cada vez más importante dentro de la industria automotriz y en beneficio de los procesos sustentables. La sustitución de monobloques y cabezas de hierro por piezas de aluminio ha creado constantes propuestas para desarrollar diferentes procesos de fundición que generan una serie de residuos que pueden ser utilizados por otras industrias.

La idea de introducir aleaciones de aluminio tiene como objetivo hacer más eficientes los vehículos y reducir el peso y la consecuencia es menos consumo de combustible. La fabricación de corazones de arena es un área de vital importancia para la industria de la fundición. Utilizar estructuras de arena permite vaciar metal líquido sin que estas estructuras sufran severas consecuencias permitiendo así que la pieza de metal cumpla con estrictas especificaciones dimensionales. La arena de fundición es un material altamente refractario, es decir, resiste altas temperaturas, siendo por consiguiente un mal conductor del calor por lo cual, es adecuado en este tipo de aplicaciones donde hay contacto con el metal fundido.

Cuando se utiliza el proceso de fundición con arena químicamente unida se utiliza arena de sílice en gran escala. Los procesos de fundición necesitan una materia prima seleccionada, cuidando su origen como en el caso de las arenas, las cuales requieren una adecuada granulometría, forma y constituyentes

mineralógicos determinados, esto en óptimo comportamiento en conjunto con los sistemas de resina. [2, 9, 10]

1.6 Perspectiva nacional de la industria de fundición.

Existe en la actualidad gran competencia en la industria de la fundición, especialmente en las pequeñas y medianas fundiciones, hay atención especial en que los productos vaciados tengan las propiedades físicas y químicas según el uso que se les dará, empleando aleantes, modificadores, refinadores de tamaño de grano así como, mediante la selección adecuada de la materia prima y el control de las condiciones de fusión, vaciado y solidificación. La reestructuración mundial de la industria automotriz ha motivado reflexiones y debates en torno al futuro de las empresas fabricantes de autopartes de los países en desarrollo, algunos autores han señalado que de este proceso puede derivarse la pérdida de capacidades tecnológicas en las empresas locales como consecuencia de la mayor participación en la industria de las filiales de proveedores internacionales. Este no es el caso de la industria de la fundición pues un grupo de empresas nacionales, ha logrado mantenerse como productores de primera línea pese a las crecientes inversiones de las empresas internacionales. El propósito de este proyecto es apoyar determinantemente el proceso de reestructuración de la cadena de servicios del sector automotriz de la industria de la fundición. Identificar las características de la estructura industrial y el impacto que la desintegración vertical de las empresas armadoras, generalmente esto ocasiona áreas de oportunidad en las cadenas de los proveedores nacionales; siendo la recuperación de materiales de desecho un punto clave para el desarrollo sostenible de la empresa. Reutilizar la arena de fundición en diferentes aplicaciones como un material de agregado, beneficiará de manera sustentable al ecosistema y reemplazará cierto porcentaje este material por arena virgen natural.

1.7 Impacto ecológico de la industria de fundición en el medio ambiente.

La utilización de arenas en el proceso de fundición conlleva el uso de diversos tipos de aglomerantes según la tecnología empleada. Muchos de estos productos contienen compuestos considerados peligrosos o especiales según la legislación nacional e internacional vigente, con la consecuente factibilidad de transferir estas características a los residuos de arenas de fundición.

El tamaño de las empresas dedicadas a la fundición de metales va desde pequeños talleres hasta grandes plantas manufactureras que producen miles de toneladas de piezas fundidas cada día. La generación de residuos está directamente relacionada con el tipo de material usado (hierro fundido, acero, bronce y aluminio) y depende del tipo de moldes y machos usados, así como de la tecnología empleada para la fabricación de los mismos. Los residuos de las operaciones de fundición en arena son inherentemente mayores que los de operaciones con moldes permanentes o matrices. La **tabla 1** presenta los residuos generados como resultado de los procesos de fundición de metales:

Tabla 1. Residuos generados en el proceso de fundición

Proceso	Residuos
Elaboración de moldes y machos	-Arena usada, -Residuos de barrido y de los machos -Polvo y lodos
Fusión	-Polvo y humos -Escoria
Colada	-Fundición a la cera -Cáscaras y ceras
Limpieza	-Residuos de limpieza

De esta forma se tiene una situación incierta en referencia a la potencialidad de contaminación del medio físico por la disposición de este residuo, no habiendo hasta la fecha estudios que den margen a esta problemática local planteada. El aumento continuo de la arena gastada, su concentración progresiva ocasionan, día a día, problemas al medio ambiente conocidos como contaminación ambiental. Ésta consiste en la presencia de residuos orgánicos (basura, arcilla, polvo, aceites, etc.) que genera la industria de fundición en el medio ambiente, ocasionando alteraciones en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, por lo que se pretende encontrar de manera sustentable una solución a esta problemática de modo que se pueda aplicar en materiales de construcción.

Hoy en día se ve reflejada la carencia de la importancia que se le debe de dar al medio ambiente respecto al uso de materias o residuos que genera la industria de fundición. Esta problemática se observa por ejemplo, debido a la acumulación de miles de toneladas de arena gastada, por lo que es necesario optimizar la selección de soluciones en una etapa de diseño de un “índice de valor” como medida de solución respecto al beneficio obtenido y los recursos consumidos como un subproducto de construcción.

El concepto de sustentabilidad en la industria de la construcción implica balancear costos constructivos y operativos, el cuidado del medioambiente, y el confort y la salud de los ocupantes como ejemplo, aumentando la eficiencia energética, un edificio “verde” reduce su impacto ambiental así, es importante recordar que los edificios consumen el 50% de la energía utilizada en el mundo desarrollado, mientras que otro 25% es utilizado en el sector del transporte. En el mundo, los edificios representan 33% de las emisiones de CO₂, 17% del uso de aguas frescas, 40% del uso de energía y materiales, y 25% del uso de la madera. En los últimos tiempos, problemas energéticos, la falta de recursos, el aumento de la contaminación debido a emisiones de gases dañinos para el medioambiente, y el calentamiento global, han generado crisis ambientales mundiales.

En la práctica, el impacto ambiental puede reducirse a través del ahorro de agua como recurso, de la disminución de emisiones tanto de CO₂ como de otros gases nocivos para el medioambiente, el ahorro de energía, el diseño sustentable de la estructura, el uso de materiales y recursos reciclables o reciclados, del aprovechamiento de la luz solar y las brisas naturales, el uso de terrenos grises (en vez de terrenos verdes).

1.8 Sustentabilidad y alternativas para la construcción.

La edificación sustentable es el diseño y construcción con materiales de bajo impacto ambiental que se pueden obtener en la misma zona. De hecho, los materiales que más contaminan son el cemento, el acero, el vidrio y el aluminio. El proceso de la construcción consume combustible impresionantemente al transportar piedra, madera, cemento y otros materiales. Asimismo, las construcciones contaminan porque se necesitan grandes cantidades de energía para enfriarlas, calentarlas e iluminarlas, y ésta se obtiene de la quema de combustibles como el petróleo, el carbón y el gas, produciendo a su vez gases de efecto invernadero que aumentan la temperatura del planeta.

Lo sustentable está asociado a la “pasividad”, es decir, a climatizar el hábitat a través de medios naturales como el máximo aprovechamiento de la ventilación, la luz natural y la orientación correcta que permiten conservar el calor durante el frío y vice-versa, reduciendo al mínimo el uso de aire acondicionado y calefacción.

Es una preocupación que ha surgido de un reconocimiento más amplio que aumento de la población y el desarrollo económico amenazan con una progresiva degradación de los recursos de la tierra. La construcción, mantenimiento y uso de los edificios de los impactos considerablemente en nuestro medio ambiente y en la actualidad contribuyendo de manera

significativa a cambios irreversibles en el clima mundial, la atmósfera y los ecosistemas. Los edificios son, con mucho, los mayores productores de gases nocivos como el CO₂. De hecho, el desarrollo sustentable no es más que otro o el medio ambiente de la política social, es una oportunidad de negocio también. El examen de sus actividades con una perspectiva más sostenible, las empresas de construcción podría ir más allá de reducir detrimento de los impactos ambientales. En muchos casos también se beneficiarán de la mejora y más rentable operación, así como una elevada reputación, tanto en la comunidad y con los clientes. En lo que respecta específicamente a la construcción, es importante destacar el uso de materiales rápidamente renovables o con altos contenidos reciclados, y así reducir la generación de residuos orgánicos, la arena gastada se puede utilizar como material para la construcción de carreteras, relleno y nivelación de superficies, así como también rellenos en la construcción de carreteras y pozos de uso industrial, pavimentos de asfalto caliente, muros de contención, en canales del sistema de drenaje, etc. Antes de emplearlas de esta forma, debe garantizarse a través de un análisis, que la arena no contenga porcentajes inadmisibles de contaminantes, como por ejemplo fenoles, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), furanos u otros.

El nivel de energía requerido por una edificación para su construcción, funcionamiento, y mantenimiento dependen tanto de su emplazamiento, del uso asignado, de la planificación del sitio, de la flexibilidad del espacio interior, de la expectativa de vida de sus materiales, de la orientación, la forma, y la estructura, de los sistemas de aire acondicionado y calefacción, y de los materiales y recursos utilizados. Es así como los beneficios de los materiales sustentables son principalmente un mayor rendimiento en términos ambientales y económicos, mayor eficacia en el ahorro de energía y recursos, la reducción de los riesgos de responsabilidades civiles, una mayor productividad, una mejor calidad ambiental interior, y una mayor valoración en la construcción ^[11]. El

deterioro ambiental y el agotamiento de los recursos naturales impactan persistentemente en la calidad de vida de las personas.

El punto de partida para todos los miembros del sector de construcción que deseen abordar la sustentabilidad como un negocio de oportunidad en grandes a pequeñas empresas y que reacondicionan los edificios existentes deben tener operaciones en cuatro áreas clave:

- **Energía:** reducir el consumo de energía, ser eficientes y utilizar recursos renovables.
- **Materiales:** re-usar y reciclar el uso de los materiales durante el diseño, la fabricación, construcción y mantenimiento para reducir las necesidades de los recursos que perjudican el medio ambiente.
- **Residuos:** Producir menos residuos y reciclar más.
- **Contaminación:** producir menos materiales tóxicos que contaminen el agua, aire y medio ambiente.

Esto conducirá a una nueva evaluación de las mejores prácticas en cada área, con los beneficios acumulados de superposición mejoras entre las áreas. La aplicación de esos resultados podría mejorar las ganancias y las inversiones, y contribuirá a un futuro sustentable para la industria de la construcción ^[12].

1.9 Planteamiento del problema

Durante los últimos años, el sector industrial ha mostrado una preocupación ascendente por la salud de las personas y la calidad del medio ambiente, además se han modificado las leyes, lo anterior debido a los problemas que han originado los residuos, sobre todo aquellos que son considerados como residuos peligrosos. Estas industrias, como las de fundiciones, han utilizado estrategias para mejorar el desempeño ambiental de la empresa y su competitividad, entre otras se han propuesto estrategias y acuerdos que conllevan a la producción limpia.

En México, la recuperación de arenas en la industria de la fundición casi no es tomada en cuenta, son muy pocas las empresas que invierten en equipo y recursos humanos para mejorar la calidad y vida útil de la arena. Una de ellas es la empresa NEMAK ubicada en el municipio de García, N.L., la cual se encarga de producir cabezas de cilindros y monobloques mediante los métodos de moldeo de caja fría, además de la producción de corazones por el sistema de caja fría y caja caliente fenólico uretánico. Estas piezas se fabrican vaciando aluminio líquido en distintos moldes para formar una variedad de piezas. La necesidad de la empresa, surge debido al depósito de bancos de arena desechada en la fabricación de monobloques y cabezas de aluminio que están asociadas a la generación de emisiones atmosféricas y residuos sólidos que contaminan al medio ambiente y perjudican al ser humano, por lo que se decidió desarrollar un estudio para la reutilización de esta arena en una aplicación como agregado para producir concreto sustentable de bajo costo, y en el cual las principales propiedades no se vean afectadas.

Los contaminantes que se pueden generar en la industria en materia de emisiones atmosféricas son: material particulado, proveniente de todas las etapas del proceso de fundición; compuestos orgánicos volátiles generados de

la etapa de producción, llenado y enfriamiento de moldes; monóxido de carbono proveniente de los procesos de fundición, colocación y transporte de material; óxidos de azufre y de nitrógeno generados en la fundición y fusión. Dentro del proceso productivo de fundición se desarrolla una etapa denominada moldeo de piezas, en la que se utilizan grandes cantidades de arena que, junto a resinas y otros aditivos, constituyen los moldes en los cuales se vierte el metal fundido. Una vez que la pieza de cabeza o monobloque ha solidificado, los moldes son demolidos para obtener las piezas por medio de un proceso mecánico, generándose con esto la denominada arena por recuperar.

La arena por recuperar proviene del molde que ha sido demolido y luego triturado para posteriormente calcinarla a alta temperatura. La arena ya calcinada se le conoce como arena recuperada. De los procesos anteriores se desprenden finos, los cuales son atrapados por colectores de polvos. Por otro lado, los corazones de arena y/o moldes de arena también sufren contaminación por estar expuestos al contacto con el piso, tierra, aluminio, y de otros contaminantes. Los finos y arena contaminada constituyen lo que se llama arena “gastada”, la cual ya no es usada para el proceso de fundición ^[13]. En la **figura 9** se aprecia la arena gastada.



Figura 9. Arena gastada.

1.10 Justificación del problema.

En el presente proyecto, se pretende estudiar el comportamiento mecánico de la arena gastada que se encuentra depositada, con el objetivo de usarlas en la elaboración de morteros, ladrillos y bloques de concreto de manera que sea económico y de bajo impacto ambiental. Se tiene que entender la importancia y la urgencia de aplicar el concepto de sustentabilidad en la industria de la construcción y en todo lo que esté involucrado con la misma, dicho concepto se define como “el uso adecuado de los recursos naturales, sin agotamiento, para que las generaciones futuras puedan contar con ellos, es decir, desarrollo con respeto hacia el ecosistema” [14].

En la actualidad, la recuperación de las arenas gastadas juega un papel importante en la conservación y protección del ecosistema, por lo tanto, es conveniente aplicar este tipo de material en la industria de la construcción. La realización de este proyecto se dio en parte porque se pensó que con él se logrará crear una conciencia ecológica y un hábito de reciclaje, que en el futuro ayudará considerablemente a la protección del planeta y sus recursos naturales, que se traducirá en la preservación de la vida.

1.11 Hipótesis.

En el presente proyecto se estudio el comportamiento mecánico de la arena de fundición gastada cuando es utilizada dentro de una matriz cementante. Esto servirá como base para justificar las líneas de investigación, cuya finalidad es reutilizar la arena desechada en la industria de la construcción con una apropiada caracterización, evaluando también los mecanismos de falla del mortero y del concreto sin afectar las propiedades mecánicas que se desarrollen una vez encontrando un buen comportamiento de los elementos fabricados, con el menor costo y de bajo impacto ambiental. El uso de la arena de fundición en la fabricación de morteros no afectará las propiedades mecánicas utilizando cierto porcentaje en la sustitución de la arena gastada.

1.12 Objetivos del problema.

General:

- Analizar el comportamiento físico, químico de la arena gastada en la industria de la fundición de aluminio de partes automotrices como agregado para la producción de morteros y concretos de cemento hidráulico de bajo impacto ambiental, sin afectar las propiedades mecánicas de los elementos fabricados.

Particulares:

- Realizar la caracterización de la estructura, propiedades químicas, físicas y mecánicas de los materiales fabricados con arena gastada.
- Analizar los mecanismos de falla en los morteros y concretos producidos con arena gastada.
- Desarrollar morteros y/o concretos sustentables con propiedades de resistencia adecuada utilizando arena gastada.
- Estudio de las fases minerales resultantes del proceso de hidratación del sistema cementante.
- Estudio microestructural de los morteros fabricados con arena gastada en microscopía electrónica de barrido.

1.13 Alcances del problema.

- Determinar la granulometría, composición y morfología de la arena gastada de la industria de fundición automotriz, para evaluar su uso en la fabricación de morteros sustentables.
- Evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido en morteros fabricados con arena gastada.
- Producir diferentes alternativas para morteros con arena gastada de la industria de fundición automotriz, económica y sustentable.

CAPÍTULO II



CLASIFICACIÓN DE LAS ARENAS DE FUNDICIÓN Y SU COMPORTAMIENTO AL USARLO EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

2.1 Tipos de arena de fundición.

La arena, es un material inorgánico compuesto de granos de mineral suelto que varían de tamaño aproximadamente desde 2 a 0.05 mm (1/12 a 1/500 pulgadas) de diámetro. Esta definición no hace referencia a la composición de los granos, así que se debe hacer referencia al nombre completo, por ejemplo, la arena de sílice, arena de zirconia, arena de cromita ^[15,16].

La mayoría de las arenas de fundición se componen habitualmente de sílice (SiO_2). En algunos casos, los granos de sílice están asociados con pequeñas cantidades de feldespato ($(\text{K.Na})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$), mica y otros minerales tales como ilmenita (FeOTiO_2), magnetita (Fe_3O_4), zirconia (ZrSiO_4), cromita (FeCr_2O_4), olivina ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$) y aluminosilicatos ^[1, 16, 17]

Las 4 composiciones básicas de arena para fundición se componen de los elementos mencionados y el nombre de la arena será asignado según sea el elemento predominante en la composición química; dichas arenas son Sílice, Olivina, Zirconia y Cromita ^[18].

En la tabla 2. Se muestran las principales características y propiedades de las cuatro diferentes arenas utilizadas en la fundición.

La arena de fundición es típicamente sub-angular a forma redonda. Después de ser utilizada en el proceso de fundición, las partes propias de la arena están en forma de aglomeración. Cuando estas son analizadas, los granos individuales de la arena son evidentes.

Tabla 2. Propiedades de arena de fundición.

Composición %	Sílice	Olivina	Cromita	Zirconia
SiO ₂	98.82	41.2	1.34	33.5
MgO	0.031	49.4	8.75	-
Cr ₂ O ₃	-	-	45.8	-
ZrO ₂	-	-	-	65
Al ₂ O ₃	0.049	1.8	21.34	1
Fe ₂ O ₃	0.019	7.1	19.50	0.03
CaO	0.0016	0.2	0.94	-
TiO ₂	0.012	-	0.03	0.19
Propiedades	Sílice	Olivina	Cromita	Zirconia
Color	Blanco/Café	Verde	Negro	Blanco
Densidad, g/cm ³	2.65-2.67	3.27-3.37	4.3-4.5	4.6-4.7
Expansión Térmica	0.018	0.0083	0.0045	0.0037
pH	Ácido	Básico	Básico/Neutral	Ligeramente Ácido
Forma de Grano	Varía	Angular	Angular	Redondo

2.1.1 Arena Olivina (Mg₂ SiO₄ + Fe₂ SiO₄).

La arena olivina ha sido usada durante muchos años como arena sustituta de la arena de sílice, esta arena se compone de orto-silicato de magnesio además de hierro y es encontrada en su estado natural en la fosterita (Mg₂SiO₄) y Fayalita (Fe₂SiO₄). La calidad del molde depende en un 90% de la fosforita presente en la composición. La fosforita es ingrediente importante y se agrega para reducir el mineral a una forma granular, aumentando lógicamente el costo debido a la producción del material. La forma de sus granos son de tipo angular, tienen fractura concoidal, su color es de varios tonos de verde y su GFN 40-160 (número de fineza del grano), presenta un pH básico.

La arena de olivina se utiliza típicamente en el sector no ferroso de la fundición, en ocasiones se utiliza en el sector ferroso para ayudar en la producción del acero austenítico debido a ella es posible superar las reacciones químicas adversas que resultan si la arena de sílice fuera utilizada.

La **arena olivina** tiene ciertas ventajas en comparación a la arena de sílice:

- No tiene minerales hidratados así que no es necesaria su calcinación previo a su uso.
- La arena olivina no sufre ninguna inversión cristalográfica con el calentamiento y por eso presenta mejor resistencia al choque térmico que la arena de sílice.
- Presenta buena refractariedad, es usada a temperatura por arriba de los 1650 °C.
- La arena olivina es la más barata de las arenas usadas para fundición después de la arena de sílice.

Existen algunas desventajas respecto al uso de la **arena olivina**:

- La demanda de ácido que presenta es ligeramente alta.
- Es relativamente un mineral débil, por que ocasiona fracturas durante los procesos de recuperación de arena por medio de atrición.

2.1.2 Arena cromita (FeO Cr₂O₄).

La **arena cromita** es un material para moldes y ofrece algunas mejores ventajas que la arena de sílice.

- Buenas propiedades de enfriamiento debido a que la difusividad de la arena cromita es 27% mayor que la de arena de sílice.

- La cromita no permite ser empapada por metales líquidos y por ello no tiene problemas por penetración, ésta propiedad es comparable a la arena zirconia.
- Buena estabilidad térmica y altamente refractaria.
- La arena cromita es ligeramente magnética, por lo que puede ser separada de otras arenas si se usa un magneto de alta intensidad.

Existen algunas desventajas asociadas a la arena cromita en cuanto a su uso en fundición:

- Debido a que es una arena que proviene de molienda normalmente sus granos son angulares.
- Presenta contaminantes como minerales hidratados y silicatos que podrían producir porosidad y defectos de erosión.
- Debido a su composición presenta valores de demanda de acida muy altos.

2.1.3 Arena Zircona (ZrO_2 SiO_2).

Esta arena se compone de silicato de zirconio y sus yacimientos están principalmente en Australia, Florida y California. Tiene las propiedades térmicas más estables de los cuatro tipos de arenas mencionados y es usada como molde ya que soporta altas temperaturas.

Las ventajas que presenta esta arena son:

- Baja demanda de ácido.
- Alta conductividad térmica y alta densidad, que en combinación proporcionan una pendiente de enfriamiento alta.

- Al igual que la arena cromita, la superficie del grano no es fácil de mojar por metales líquidos, derivando como consecuencia en una alta resistencia a ser penetrada por el metal.
- Baja expansión térmica.

Las desventajas que presenta el uso de la arena cromita son:

- Los granos de arena zirconia son ligeramente elípticos y su distribución es solamente en dos o tres mallas.
- La arena zirconia tiene una densidad de 4.4 - 4.7 kg/cm³ por lo que se considera como la arena más pesada.

2.14 Arena Sintética.

La arena cerámica es un desarrollo de los últimos años en busca de mejorar las propiedades de las actuales arenas utilizadas, entre sus características principales destaca una baja expansión térmica, esto recae en la precisión y exactitud de las dimensiones en las piezas. Entre otras cualidades puede llegar a prevenir defectos como penetración y pandeamiento.

La arena sintética puede ser base carbono o de aluminio silicatos.

- Arena de carburos **a.**

Esta arena se forma al calcinar el coque de petróleo y es químicamente inerte, tiene densidades menores a las arenas mencionadas anteriormente. Entre sus principales propiedades esta la casi nula expansión térmica, lo que permite una muy alta resistencia a defectos por penetración del metal, tiene aproximadamente la misma estabilidad térmica que la arena zirconia, conducen muy bien el calor, es posible que el desempeño con ciertos aglutinantes no sea el óptimo.

- Arena base aluminio silicatos **b**.

Esta arena tiene un pH de 6.4 y una demanda de ácido muy baja, por lo que puede ser usada en sistemas que necesiten un catalizador ácido. Los inconvenientes de este tipo de arena son su alta porosidad y su expansión térmica. En la tabla 3 se muestran las propiedades físicas y químicas a 1100°C de dos muestras (a y b, diferentes entre sí en el en GFN), comparadas con arena zirconio, cromita y sílice.

Tabla 3. Propiedades físicas y térmicas de arenas de fundición.

Propiedad	Arena Cerámica a	Arena Cerámica b	Zirconia	Cromita	Sílice
GFN (Número de fineza del grano)	40	40	110	50	60
Coefficiente de expansión (1E-6 -C°)	6.62	6.61	4.75	9.06	16.85
Conductividad Térmica (W/m-C°)	0.70	0.74	0.63	0.94	1.14
Difusividad Térmica (cm ² /s)	0.0029	0.0035	0.0025	0.033	0.0054

a: Arena de carburos.

b: Arena aluminio silicatos.

Al ser considerada una posibilidad para ciertos proyectos en el sector de fundición, las propiedades químicas tienen un papel importante y se evalúan con los mismos criterios que arenas regularmente usadas. En las tablas 4 y 5 se pueden observar los principales componentes que presentan estas arenas para la fabricación de los moldes de fundición.

Tabla 4. Mineralogía (%) de la arena cerámica

Mineral	Arena Cerámica a, %	Arena Cerámica b, %
Mulita	52	75
Corundum	48	0
Cristobalita B	0	13
Cristobalita amorfa	0	12
Sílice	0	0

a: Arena de carburos.

b: Arena aluminio silicatos.

Tabla 5. Propiedades y composición química de la arena cerámica.

Propiedad	Arena Cerámica a	Arena Cerámica b
Al ₂ O ₃ , %	75.0	47.7
SiO ₂ , %	11.0	48.5
TiO ₂ , %	3.0	2.1
Fe ₂ O ₃ , %	9.0	1.0
LOI, %	0.15	0.02
Humedad, %	0.03	0.08
pH	6.9	6.9
ADV @ pH 5	0.6	-1.3
ADV @ pH 7	0.0	-1.7

a: Arena de carburos.

b: Arena aluminio silicatos.

2.1.5 Arena de sílice.

Las arenas de sílice (SiO₂) se localizan principalmente por el depósito de arena a lo largo de las costas, donde estos depósitos fueron enterrados bajo una gruesa capa de sedimento que posteriormente se consolidaron para formar piedra arenisca. El levantamiento y desplazamiento de la superficie de la tierra 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 arena de sílice está constituida, fundamentalmente, por granos de cuarzo (SiO₂). 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.

La **arena de sílice** es empleada para la fundición, principalmente, por las siguientes razones: ^[13,16, 19]

- Es la más abundante en la naturaleza.
- Facilidad de extracción de los depósitos minerales naturales.
- Se encuentran en una gran variedad de tamaños y distribuciones.
- Altamente refractaria y resistente al calor, dependiendo de la pureza de la arena de sílice su punto de fusión esta alrededor de los 1550 -1650°C.
- Por su bajo costo en relación con otras arenas.
- Por tener compatibilidad con la mayoría de los aglutinantes orgánicos e inorgánicos.
- Por su resistencia al ataque químico.

Sin embargo, la arena de sílice no es el único material empleado en la fundición para hacer moldes y corazones debido a que presenta la desventaja de sufrir cambios mineralógicos de fase produciendo expansiones en los moldes al momento del vaciado del metal apareciendo algunos defectos de vaciado.

2.2 Propiedades de la arena de sílice y de la arena de fundición.

2.2.1 Composición química de la arena de sílice.

Las arenas de sílice se caracterizan por tener una alta pureza y un comportamiento neutro. La mayoría de las partículas contenidas en las arenas son de naturaleza neutra, con la notable excepción de la olivina, las partículas contaminantes están contenidas en las arenas en un tamaño muy fino, en las mallas mayores al # 140.

Las arenas están compuestas casi en su totalidad de sílice, junto con ésta se encuentran ciertos contaminantes que pueden ser benéficos al momento de vaciar. Los constituyentes típicos de la arena de sílice se pueden ver en la tabla 6 ^[20].

Tabla 6. Constituyentes típicos de la arena sílice.

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

2.2.2 Características físicas de la arena de sílice.

2.2.2.1 Granulometría de la arena de sílice.

Esta característica indica el tamaño y la distribución del grano de la arena, se expresa hoy en día, casi universalmente, por el No. GFN. El cual se representa por medio de un análisis de distribución de mallas de un determinado diámetro, el resultado del análisis indica si la arena es de tipo gruesa, mediana o fina.

Las principales características relacionadas con el tamaño de grano son la permeabilidad y el acabado superficial. El tamaño de grano de una arena es determinado mediante una prueba de análisis de malla y se denomina tamaño de grano *AFS* (*American Foundrymens Society grain fineness number*, el *AFS gfn*). El *AFS gfn* y la distribución de mallas pueden ser calculados mediante este prueba. La arena gruesa (GFN menor de 45 y un porcentaje de finos menor a 3), la ventaja de este tipo de de arena es que se utiliza menor cantidad de resina para recubrir los granos, tiene mayor fluidez la mezcla y mejor permeabilidad de los corazones. La arena fina se considera con un *AFS gfn* mayor a 55 y un porcentaje de finos mayor a 7%, tienen una mayor área

superficial, lo que otorga propiedades diferentes a las de una arena gruesa. Debido a que la arena gruesa tiene una menor área de superficie, que le confiere las siguientes ventajas:

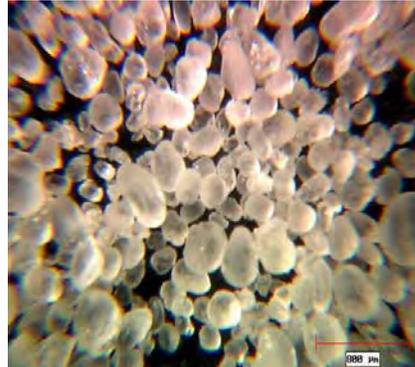
- Menor cantidad de resina para recubrir el grano.
- Mayor fluidez de la mezcla.
- Mejor permeabilidad del corazón para eliminar los gases durante el vaciado de la pieza.
- Al utilizar menos resina se facilita el desarenado de las piezas vaciadas.

2.2.2.2 Forma del grano.

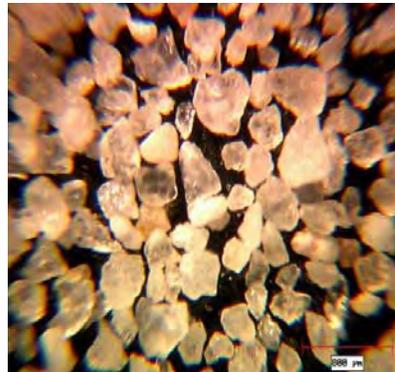
La forma de grano afecta las propiedades físicas de los moldes. Una arena con forma redondeada de grano requiere cantidades de aglomerante, comparada con las arenas que tienen forma angulares debido a que las arenas redondeadas tienen menor área superficial, las arenas de forma redonda también fluyen mejor y con estos conforman los moldes y corazones más densos. Las arenas angulares son las de menor uso dentro de las fundiciones, ya que presentan muchos problemas de rompimientos de corazones por la configuración del grano, además de que estas tienen la desventaja de que los corazones muestran baja permeabilidad al acomodarse las partículas de una forma tal que obstruyen la salida de los gases de combustión de la resina. Los granos de arena pueden clasificarse, por su forma, en redondeados, sub-angulares, angulares y compuestos dichas morfologías se pueden observar en la **figura 10.a, b, c.**

Para definir de una manera más precisa la forma de los granos, se utiliza el coeficiente de angularidad. Por este coeficiente se entiende la relación de la superficie real del grano de arena a la superficie que tendría, si fuese una esfera.

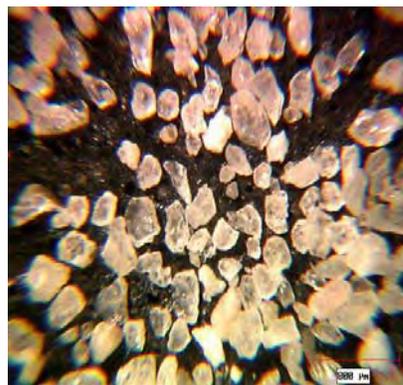
Los granos redondos proveen el mejor arreglo de los poros conectados y también la mínima relación área - volumen. Un grano redondo entonces proporcionará la mayor permeabilidad y requerirá la menor cantidad de resina para ser recubierto, caso contrario al de tipo angular y sub-angular.



a)



b)



c)

Fig. 10. a. Morfología de grano redonda, b. Morfología del grano subangular, c. Morfología de grano angular.

2.3 Características físicas de la arena gastada.

La arena gastada de fundición tiene baja capacidad de absorción y no es plástica. El contenido de impurezas orgánicas (particularmente de sistemas del carbón de mar) puede variar extensamente y ser absolutamente alto. Esto puede perjudicar en el uso de aplicaciones donde las impurezas orgánicas podrían ser importantes como agregado para el concreto del cemento Pórtland ^[21]. La densidad específica de la arena de fundición varía entre 2.39 y 2.55. La variación entre los valores de la densidad específica podría ser debido al agregado fino y el contenido de aditivo en diversas muestras ^[22]. Las arenas de fundición son generalmente secas, con contenidos de humedad menos al 2%.

2.3.1 Composición química de la arena gastada (greña).

La arena gastada (greña), se caracterizan por tener un importante porcentaje de aluminio y compuestos de residuos orgánicos. La arena de greña se utilizó tal y como se extrajo de los bancos de arena por lo que no se le hizo ningún tratamiento. Esto se observa en la **tabla 7**.

Tabla 7. Composición química de la arena gastada (greña).

#	Nombre del Componente	%
1	Na ₂ O	0.259
2	MgO	0.237
3	Al ₂ O ₃	6.190
4	SiO ₂	89.500
5	P ₂ O ₅	0.038
6	SO ₃	0.081
7	Cl	0.000
8	K ₂ O	0.141
9	CaO	0.940
10	Ti	0.000
11	Cr	0.000
12	MnO	0.038
13	Fe ₂ O ₃	2.010
14	Co ₃ O ₄	0.021
15	CuO	0.224
16	ZnO	0.032
17	Se	0.000
18	SrO	0.000
19	ZrO ₂	0.022
20	RuO ₂	0.064
21	WO ₃	0.239
22	Au	0.000

2.3.2 Granulometría de la arena gastada (greña).

Para determinar la distribución granulométrica y el grado de finura de la arena, se utiliza un método analítico, usando diferentes tamices superpuestos, en orden de diámetro de poro o malla, empezando por el de menor diámetro en la parte inferior.

Su procedimiento se realiza pasando arena seca y lavada por once tamices sucesivos con aberturas de mallas sucesivas y numeradas según la cantidad de mallas por pulgada lineal. El peso del residuo de cada tamiz y el peso de la arena retenida en el recipiente, se multiplica por un factor cuyo valor depende del tamiz en cuestión.

Se suman todos los productos y finalmente se divide esta suma entre el peso total de la muestra ensayada, obteniéndose el porcentaje retenido en cada tamiz. La medición del peso retenido por los tamices de prueba determina el porcentaje de la muestra. A continuación en la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos de la granulometría de la arena gastada en greña.

Tabla 8. Granulometría de la arena gastada (greña).

Tamaño mm	Malla #	Retenido Parcial g	Retenido parcial %	Retenido acumulado %	% Que pasa
297	50	54.68	28.68	28.68	71.3
149	100	116.00	60.84	89.52	10.5
74	200	17.45	9.15	98.68	1.3
44	325	1.87	0.98	99.66	0.3
< 44	Charola	0.65	0.34	100.00	0.0
	Σ	190.65	99.99		

2.3.3 Propiedades físicas y mecánicas de la arena gastada.

Valor de demanda ácida y prueba de pH de la arena.

Esta característica indica el grado de acidez o alcalinidad de la arena. El pH es un indicador de las impurezas encontradas en la arena. La prueba del ADV determina la cantidad de elementos alcalinos solubles en ácido. La prueba de pH indica la cantidad de elementos alcalinos solubles en agua. Por esta razón se debe determinar el pH de las arenas, debido a que arenas muy básicas tienden a acortar la vida de banco de la mezcla. En la recuperación térmica de la arena se generan componentes alcalinos que se van acumulando en cada

reciclaje de la arena y provoca el aumento de pH por lo que es necesario monitorear para tener un control.

Los factores que influyen para aumentar el pH en la arena son:

- Alto contenido de finos (mallas #200, #270 y fondo).
- En la recuperación térmica, la alta temperatura genera componentes alcalinos como óxido de calcio (CaO), alúmina (Al_2O_3), etc. y que son acumulativos en cada reciclaje.
- La presencia de contaminantes como partículas de aluminio, hierro y carbonato de calcio.

2.3.3.1 Valor de la demanda ácida (ADV).

El valor de la demanda ácida (ADV), determina las sustancias alcalinas solubles en ácido. La arena alcalina con un valor de demanda ácida mayor de 7 y un pH mayor a 8, promueve una menor vida de banco debido a que los componentes alcalinos neutralizan una porción de la resina y aceleran drásticamente la reacción entre las dos resinas.

2.3.3.2 Pérdidas por ignición (LOI).

La prueba de pérdidas por ignición (LOI por sus siglas en inglés) es un ensayo que se utiliza para determinar el porcentaje de materiales orgánicos que se encuentran en la arena. Este ensayo se utiliza con arena nueva, recubierta o recuperada. Típicamente este ensayo se realiza tomando una muestra de arena de entre 4 y 6 gramos y se expone durante una hora a 980 °C. El L.O.I se registrará como el porcentaje de cambio de peso de la arena después de transcurrir el tiempo a alta temperatura. El valor de esta medición indica la cantidad de resina o aditivos residuales adheridos a los granos de arena después de la calcinación, si el índice de L.O.I es alto, se producirán falsas adherencias entre los granos de arena y las resinas, generando corazones débiles.

2.4 Reciclaje de la arena de fundición de manera sustentable para la fabricación de materiales de construcción.

La generación de residuos industriales como arena gastada se ha incrementado en los últimos años en una relación directa a los niveles de riqueza y de avance de la tecnología de producción de monobloques y cabezas de aluminio. Para llegar a esta situación, han influido varios factores entre los que fundamentalmente se pueden destacar el aumento de la generación de la arena gastada y por consiguiente residuos orgánicos que perjudican al medio ambiente, para tratar de minimizar su impacto ecológico se decidió reutilizar la arena gastada en el ámbito de la generación de nuevos los materiales de construcción de manera que apoyen los procesos sustentables.

En este proyecto se realizaron varias pruebas para definir la posibilidad de reutilización de la arena gastada, determinamos: la reducción en la generación de arena gastada, el fomento y consumo de la reutilización o del reciclaje de la arena desechada. Los materiales industriales que no son utilizados en la construcción, tales como las arenas de moldeo son productos valubles que se pueden utilizar como un material de agregado en aplicaciones de construcción de manera sustentable.

2.5 Medidas para la gestión sustentable de arena de fundición gastada.

Es posible una mayor recuperación de arenas en el entorno productivo dentro de la industria de fundición, lo cual beneficiaría en términos económicos a las empresas y reducirá el posible impacto ambiental de manera sustentable. Para ello es necesario conocer previamente que tipo y cantidad de arenas usadas de moldeo se generan y a su vez los sitios puntuales de disposición final. Se sugiere un adecuado tratamiento para la recuperación de las arenas gastadas e

implementar un sistema de trituración de las arenas conglomeradas que por su tamaño no son incorporadas a los moldes y por tanto no pueden ser reutilizadas.

Para la gestión sustentable de la arena gastada se realizaron ensayos para evaluar la factibilidad de la arena en aplicaciones dentro de la construcción, de este modo se logrará la valorización del uso de este material. Los ensayos se llevaron a cabo en los Laboratorios del IIC (Laboratorio del Instituto de Ingeniería Civil).

La innovación en la reutilización de arenas dentro del propio sistema productivo y la inmovilización de las arenas en la construcción tiende a generar un sistema de gestión sustentable en la aplicación de la arena gastada. Este sistema debe ir acompañado de una legislación y una política de estado coherente con las realidades sociales, económicas y del medio físico natural de cada localidad.

El tamaño de las empresas dedicadas a la fundición de metales va desde pequeños talleres hasta grandes plantas manufactureras que producen miles de toneladas de piezas fundidas cada día. La generación de residuos está directamente relacionada con el tipo de material usado (aluminio) y depende del tipo de moldes y machos usados, así como de la tecnología empleada.

Los residuos de las operaciones de fundición en arena son inherentemente mayores que los de operaciones con moldes permanentes o matrices. Por lo tanto, este trabajo se centra en las fundiciones en arena gastada.

CAPÍTULO III



USO DE LA ARENA DE GASTADA EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

3.1 Antecedentes en la aplicación de la arena de fundición.

La arena de fundición es un agregado básicamente fino, puede ser utilizada de la misma manera que las arenas naturales o manufacturadas. Sus usos en aplicaciones de la ingeniería civil son en terraplenes, terraplenes fluidos, asfalto caliente, lechadas en morteros, pavimentación con asfalto caliente, en concreto de cemento Pórtland y en otras aplicaciones como el uso agrícola de tierra vegetal. Los estudios se han dirigido al reemplazo ó reutilización de arenas de fundición gastadas en los diferentes procesos de fundición en los que se han ido acumulando sin poder darle un reúso a estas arenas ^[23,24], para ello se evalúa el comportamiento de la arena reciclada en comparación con la arena que se usa regularmente en mezclas de concreto y otras aplicaciones. La principal diferencia es la limpieza de la arena nueva, sus propiedades y su menor peso unitario.

El uso de arena reciclada es una práctica extendida en Norteamérica, produciéndose suelos compactados graduados que tienen un gran consumo de arena desechada dentro de la industria de fundición ^[25]. Estos trabajos se concentran en aplicaciones donde la arena de sílice gastada es parte de los moldes de piezas vaciadas ferrosas pero, no se ha realizado estudios considerando el principal material contaminante de la arena sílice, el aluminio, tal y como sucede dentro de la industria automotriz y con el uso de aglomerantes de tipo químico en lugar de arcillas naturales como sucede en las fundiciones de materiales ferrosos; por lo que el estudio de estas arenas deberá arrojar notables diferencias. Los moldes con arena químicamente unida con resina están constituidos en un 98% en peso de arena. Las mezclas de arena generalmente utilizan cantidades no mayores al 2 % de resina sobre el peso de la arena por lo que, es necesario conocer las propiedades que definan a los materiales antes de ser utilizados para conocer el comportamiento mecánico que tendrán al mezclarse y así poder anticipar un buen comportamiento cuando se encuentren mezclados como se ha explicado anteriormente.

El éxito de usar la arena de fundición gastada acarrea diversos beneficios en la aplicación de los materiales de construcción con un desarrollo en la economía, logrando así el reusó de la arena de manera sustentable.

La arena de fundición gastada ha sido usada benéficamente en E.U, notablemente en las ciudades de Wisconsin, Michigan, Illinois, Iowa, Indiana, Minnesota, Pennsylvania, Ohio, California, Texas, y Luisiana. En el año 2000, un investigador llamado Alexander A. Bol'shakov realizó numerosas aplicaciones agrupadas a proyectos en cada estado de E.U, utilizando la arena de fundición como un material de subproducto, siendo este documentado por la industria de fundición ^[26].

La Sociedad Americana de Fundidores (*AFS*), realizó un trabajo utilizando arena de fundición reciclada para la construcción de un terraplén fluido en un proyecto de obra en el aeropuerto de Cleveland ^[27]. La arena de fundición usada para este proyecto fué mezclada con ceniza volante y cemento.

Hace unos años Tarun R. Naik realizó una investigación en la Universidad de Wisconsin utilizando un reemplazo del 35% de arena de fundición gastada retenido en malla #200 en relación con arena limpia, este porcentaje de sustitución de arena gastada se empleo para evaluar el funcionamiento de los bloques de concreto de albañilería en sustitución de arena limpia. Los bloques de concreto fabricados con arena gastada de reemplazo mostraron buenos resultados en la resistencia a la compresión a los 28 días con un valor de 1500 Psi. La absorción del agua y la densidad, estuvieron en los rangos especificados conforme a los estándares de ASTM ^[28].

En Noviembre del 2007, se realizó una investigación en la fabricación de ladrillos de revestimiento reutilizando entre el 2.5 y 5 % de arena de fundición gastada en relación a la arena limpia. Los resultados fueron favorables respecto a la inclusión del porcentaje utilizado para este estudio de la arena gastada en

relación con la estética de los azulejos de los ladrillos. Se considera que un reemplazo más alto es factible pero es necesario confirmarlo mediante otra investigación con un reemplazo de arena gastada más alto. Las arenas gastadas utilizadas en este estudio fueron derivadas de una planta industrial que se dedica a la producción de moldes de acero. Esta planta industrial produce aproximadamente 1000 toneladas mensuales de arena de fundición gastada ^[29].

En el año del 2003, Mr. Joe Alexander realizó un estudio en el área de Cleveland, Ohio utilizando arena de fundición gastada como material de relleno para terraplenes y la construcción de carreteras. La arena para este estudio fué extraída de la Península de Michigan de un proceso de moldeo que se utiliza para la fabricación de bloques de motor de una compañía de autos. Esta industria automotriz produce 325,000 toneladas de arena de fundición por año. En este estudio realizado se pudo observar que los contratistas al utilizar la arena gastada se ahorraron entre el 25 y 30% de material de arena limpia ^[30]. El costo para la construcción del terraplén en un inicio con arena limpia fué de USD \$30/yd³, después de unos años el terraplén construido tuvo algunos problemas en la carpeta asfáltica por lo que se tuvo que reparar utilizando arena de fundición gastada beneficiándose con un costo de USD \$8/yd³, dando resultados favorables con el uso de la arena de fundición gastada.

Estudios realizados por la Sociedad Americana de Fundidores (*AFS*), con arena de fundición gastada ha encontrado que el reemplazo de arena de fundición gastada con resultados satisfactorios está entre el 33% de sustitución de arena limpia aplicados en el uso del concreto Pórtland. Las pruebas realizadas para el análisis del comportamiento de estas arenas se vió favorable en los resultados de resistencia a la compresión, resistencia a la tensión y en los módulos de elasticidad ^[31].

En el año 2007, R. Siddique realizó un estudio sobre el efecto del uso de la arena de fundición en las propiedades mecánicas del concreto, durante esa investigación se utilizaron tres porcentajes de reemplazo de arena de fundición gastada para la fabricación del concreto como un material de agregado fino. Los porcentajes utilizados en el estudio realizado fueron el 10, 20 y 30 % de arena gastada. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, resistencia a flexión, resistencia a la tensión y los módulos de elasticidad, estas pruebas fueron evaluadas a 28, 56, 91 y 365 días de curado. Los resultados de las pruebas realizadas indicaron un aumento en la resistencia del concreto con la inclusión de arena de fundición gastada como reemplazo del agregado fino y del que puede ser utilizado eficazmente en la fabricación de concreto de buena calidad y en los materiales de construcción. A los 28 días, la resistencia a la compresión de la mezcla con el reemplazo del 10% obtuvo un valor de 29.7 MPa, la del 20% obtuvo 30.0 MPa y finalmente la del 30 % fue de 31.3 MPa ^[32].

3.2 Uso de la arena de fundición.

3.2.1 Uso de la Arena de fundición gastada en terraplenes

Un estudio patrocinado por la Federal Highway Administration, realizó un estudio sobre una sub-base en una carretera en Ohio, utilizando arena de fundición gastada como un material de construcción en terraplenes con características hidráulicas favorables en base al tipo de suelo, a la distribución del número de grano, a la resistencia de compresión, a la compactibilidad, a la gravedad específica y permeabilidad ^[33]. La arena de fundición para este estudio consiste en arena uniforme, con un aspecto fino y de forma sub-angular. El comportamiento plástico que presentó la arena gastada para este estudio fué favorable aun con cierto contenido de arcilla. La arena de fundición para este estudio tuvo del 6-10% de arcilla, un límite líquido (LL) mayor de 20 y un índice plástico (PI) mayor de 2. Se realizaron estudios de resistencia a la compresión y fueron propicios para el buen funcionamiento de la sub-base, **(figura 11)**. Los estudios realizados en la arena de fundición gastada

cumplieron con los métodos de prueba y los estándares de calidad. La cantidad de lixiviación producida fue controlada con la adecuada compactación de la arena impidiendo la infiltración del agua sobre el pavimento.



Figura 11. Terraplén con arena gastada.

3.2.2 Uso de la arena de fundición gastada en concreto Pórtland Hidráulico.

El concreto del cemento de Pórtland (PCC) es una mezcla de aproximadamente 25% agregado fino, 45% agregado grueso, 20% de cemento y 10% de agua. La arena de fundición se puede utilizar beneficiosamente en la producción de concreto como reemplazo del agregado fino. El tipo de grado de los agregados finos esta especificado por la norma ASTM C33-04 ^[34]. Generalmente, la arena de fundición es demasiada fina al permitir completamente la substitución. El porcentaje de los materiales que pasan los tamices No.30, 50 y 100 son demasiados altos. Al encontrar la especificación, es necesario quitar los finos o mezclar la arena de desgaste con arenas más gruesas ^[35].

La Sociedad Americana de Fundidores (AFS), en la ciudad Illinois, realizó un estudio usando la arena de fundición como substituto de agregado fino en el concreto ^[36]. Deduciendo que cuando las arenas de fundición no son tan finas,

se substituye una porción del agregado fino por arena de fundición gastada, dando en el concreto producido una resistencia a la compresión y un módulo de elasticidad favorables, comparando estos valores con mezclas que contenían arena natural. Por otra parte, las arenas verdes de fundición que no estaban procesadas no fueron utilizadas, por lo que se remplazo el 33% de agregado fino, y por consiguiente la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días fué de entre 17.93 MPa y 27.58 MPa ^[37]. Estos concretos con baja resistencia pueden ser utilizados en aplicaciones que no requieren un nivel estructural, como se muestra en la **figura 12**.



Figura 12. Concreto de cemento Pórtland con arena gastada.

La disminución de la resistencia a la compresión del concreto, así como la resistencia a la tensión y los módulos de elasticidad, fué atribuído a la cantidad de finos y materiales orgánicos (arcilla fina) de la arena de fundición. Asimismo, la arena de fundición se utilizó para hacer pavimentaciones con bloques y ladrillos. En estas aplicaciones, la arena de la fundición substituyó el 35% del agregado fino ^[37], encontrando que el módulo de fineza no fué excedido, y que el concreto producido fué aceptable tanto la resistencia a compresión, la absorción y densidad.

La arena de fundición gastada tiene un color grisáceo, al ser aplicada en algunos concretos el acabado suele tener un color grisáceo/negro, por lo que en algunas aplicaciones no suele ser muy agradable. Con un reemplazo de arena gastada del 15 % o menos, el cambio de color es inapreciable por lo que cumple con los requisitos del fabricante en el acabado de los materiales de construcción ^[37].

3.2.3 Uso de la arena de fundición gastada en lechadas y morteros.

Los morteros consisten principalmente de arena, cemento y otros aditivos, y se utilizan en construcciones de albañilería, (**figura 13**). Sus principales usos son articular y sellar unidades de concreto en la mampostería, a fin de fortalecer las estructuras de mampostería en unión con el acero de refuerzo, y para proporcionar calidad arquitectónica. La pasta de cemento ocupa el espacio entre las partículas de arena y lo vuelve más trabajable. La arena usada en las pastas de mortero de mampostería en general, se especifica en la norma ASTM C144-04 ^[38]. El color de la arena de fundición puede impartir una sombra oscura en el mortero, por lo que debe considerarse aceptable antes de su uso en proyectos arquitectónicos ^[39].



Figura 13. Lechada de morteros con arena gastada.

3.2.4 Uso de la arena de fundición gastada en el mezclado de asfalto caliente.

Se han realizado estudios de la arena gastada utilizada en fundiciones ferrosas y puede ser utilizada como agregado fino en pavimentos de asfalto caliente [22,40,41]. En Estados Unidos se realizaron diferentes estudios donde se utilizó el 10, 15 y 30% de reemplazo de arena de fundición gastada mezclada con arena limpia natural en pavimentos de asfaltos, teniendo resultados favorables en la resistencia y durabilidad. El uso del agregado fino en esta aplicación tuvo ciertas especificaciones las cuales dependían del porcentaje que pasaba en la malla #200 comprendido entre el 5 y 10 % de arena gastada y de las características generales de la necesidad de la planta hornada de asfalto [40].

Como un punto importante en la especificación se menciona que las arenas gastadas de fundiciones no ferrosas, pueden contener una alta concentración de metales pesados que pueden imposibilitar su uso como agregado en la construcción del pavimento. El uso comercial de la arena de fundición en los Estados Unidos es densamente limitado, hay muy pocas aplicaciones de campo documentado del uso de la arena de la fundición en mezclas de asfalto en pavimentos, como se observa en la **figura 14**. Un estudio de la AFS sobre el uso de las mismas en asfalto, obtuvo características de resultados concretos (usando la arena de fundición del 10 %) comparando con las mezclas de control (sin la arena de fundición), los resultados indicaron que poca diferencia en las características del diseño de Marshall (vacíos en agregado mineral, estabilidad, flujo, y peso de unidad) [41].

La arena de fundición gastada fué usada en la Universidad de Wisconsin como un material de agregado en asfalto caliente mezclado, generalmente se le realiza una prueba de índice plástico que cumpla con los requerimientos de las propiedades del pavimento. Estas pruebas detectan la porción del contenido de arcilla y residuos orgánicos, que son muy perjudiciales a la adherencia del

agregado en la carpeta asfáltica. La arena de fundición gastada tuvo efectos positivos en esta aplicación, buena resistencia al desgaste y un control adecuado de la humedad ^[42].

Un estudio realizado en los Estados Unidos utilizando arena gastada fue realizado por la Universidad de Purdue, se utilizó un reemplazo del 30% de arena gastada en la fabricación de especímenes que fueron analizados mediante diferentes pruebas. Las muestras que contenían el 30% de reemplazo de arena gastada obtuvieron un aumento de vacíos de aire, la formación de poros y baja resistencia a compresión ^[43].



Figura 14. Asfalto caliente con arena gastada.

Un estudio realizado en los Estados Unidos con el uso de la arena gastada de fundición ferrosa en la mezcla de asfalto caliente, manifestó que la arena gastada mezclada con asfalto ha demostrado resultados favorables en la pavimentación y es un material que se utiliza con mayor frecuencia en los Estados Unidos para el uso de carreteras y caminos que resguardan al pavimento con el 94% de asfalto, **(figura 15)** ^[44]. El tipo más frecuente de pavimentación en el asfalto es el de mezclado de asfalto caliente (HMA). Esto consiste en una combinación de agregados gruesos y finos secados en planta, mezclando cemento y asfalto caliente para la formación de la carpeta asfáltica. La arena de fundición se ha utilizado con éxito para substituir una porción del

agregado fino usado en HMA. Es importante que la arena de fundición este limpia de arcilla y polvo para que la mezcla de asfalto sea de alta calidad. Estos estudios han demostrado que la arena de fundición puede ser utilizada para substituir entre el 8 y 25% del contenido de agregado fino.



Figura 15. Asfalto caliente mezclado con arena gastada ^[45].

3.2.5 Uso de la arena de fundición gastada en terraplenes fluidos

En los Estados Unidos se ha utilizado la arena de fundición como un componente importante en terraplenes fluidos que están compuestos de una clase de materiales de ingeniería que tienen las características y aplicaciones tradicionales incluyendo suelo compactado, suelo-cemento y concreto. Las mezclas fluidas consisten en arena, agua, cemento y usualmente ceniza volante ^[46]. El American Concrete Institute (ACI), define al terraplén fluido como un material cementante que está en un estado fluido en la etapa de colocación y tiene una resistencia a la compresión especificada de 1200 psi en menos de 28 días. Los terraplenes fluidos se han utilizado como relleno para estructuras de puentes, incluyendo los estribos, alcantarillas y fosas. Los materiales de terraplén fluido ofrecen generalmente una ventaja económica sobre el costo de colocación y condensación de la tierra.



Figura 16. Terraplenes fluidos con arena gastada.

3.2.6 Uso de la arena de fundición gastada en la agricultura.

La arena de la fundición se puede utilizar como un aditivo en materiales de tierra vegetal o en la agricultura. Es ideal para la producción de tierra vegetal debido a su uniformidad, consistencia, y al color oscuro. Se requiere añadir un alto contenido de arena de fundición para la tierra vegetal, ya que es un ingrediente esencial que beneficia a la tierra (**figura 17**). Dentro de su comportamiento, la arena de la fundición reduce la formación de grupos y evita que la mezcla se compacte. Esto permite circular el material y evita la descomposición de la tierra en la agricultura. Para estos usos, la presencia de arcilla es beneficiosa, puesto que promueve la retención de alimentos ^[39].

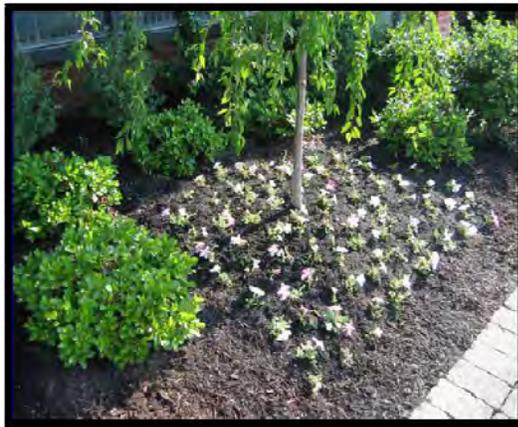


Figura 17. Uso de Arena de fundición gastada en la agricultura.

3.2.7 Uso de la Arena de fundición como material de tracción en la nieve y hielo.

Otro posible uso de la arena de fundición gastada es como material antideslizante en los caminos cubiertos con nieve y hielo. Sus partículas angulares mejoran la tracción en las carreteras en el invierno. Asimismo, su color negro llevará a cabo el calor más largo y de manera clara por lo que el beneficio de aplicar la arena gastada sobre el camino de nieve derretirá el hielo rápidamente. Característicamente, la arena de la fundición gastada es demasiado fina por lo que en algunas especificaciones de caminos antideslizantes requiere que se mezcle con agregado grueso logrando así un buen desempeño como material de construcción ^[39].

3.2.8 Uso de la arena de fundición como material de fusión.

Otro uso potencial para la arena de la fundición es como materia prima en la fusión del zinc y del cobre como se observa en la **figura 18**. La arena de fundición puede ser usada en lugar de arena virgen. Los criterios para utilizar las arenas de sílice en la fusión del zinc y del cobre son que la arena debe ser sílice relativamente pura (mínimo 99.0%), tener un tamaño de partícula máximo de 2mm y un contenido de granel de fenol de menos de 2 mg/kg (PPM). La fundición debe demostrar a la planta de fusión que la arena de fundición cumple los criterios requeridos y produce el zinc y el cobre de alta calidad ^[39].



Figura 18. Uso de Arena de fundición gastada como material de fusión.

3.2.9 Uso de la arena de fundición gastada como material de fabricación de lana mineral.

La arena de fundición gastada comúnmente es usada para reforzar otros materiales de construcción, tales como un material de aislamiento, y es similar a la fibra de vidrio. La arena de fundición puede servir como fuente de sílice en el proceso de producción de lanas de mineral. Estas son producidas por la combinación de la escoria con la sílice o alúmina dentro del horno de cúpula e inmediatamente la fibra de zinc se funde. La arena de fundición para ser usada en este proceso de producción debe estar pre-tratada y formada en briquetas [47].

3.2.10 Uso de la arena de fundición gastada en la fabricación de la fibra de vidrio.

La arena de fundición gastada se puede utilizar en la fabricación de fibra de vidrio. La fibra de vidrio es producida fundiendo la arena de sílice y filtrándola a través de un tamiz de platino con agujeros microscópicos, de modo que se formen las fibras de vidrio deseadas. Los fabricantes de fibra de vidrio tienen especificaciones para el contenido de sílice y distribución del tamaño de partícula, así que de ser utilizado en esta aplicación, la arena de fundición gastada debe tener las propiedades necesarias para su uso [47].

3.3 Subproductos de la industria de fundición con arena gastada en materiales de construcción.

La fundición de metales es un proceso antiguo en el que los metales fundidos se convierten en productos útiles a través de que se vierte en los moldes de diferentes tamaños y formas. Los productos de fundición se encuentran prácticamente en todos los productos de consumo y comerciales, que van desde bloques de motor hasta para piezas de aviones ligeros. La mayoría de las fundiciones utilizan la arena como su medio de moldeo primario, aunque hay otras tecnologías de calidad. Durante el proceso de moldeo y el mezclado del

aluminio se derivan partículas ferrosas (hierro y acero), mientras que las partículas de aluminio son las que se producen más del 90 por ciento de los traslados de volumen formando así grandes bancos de desecho de arena gastada.

La industria de fundición genera una serie de subproductos, debido a la acumulación de arena gastada. La Sociedad Americana de Fundidores (AFS), ha realizado estudios con arena gastada en los que se le ha dado un reuso en diferentes aplicaciones con grandes beneficios en los materiales de construcción de modo sustentable. Algunos usos que se han desarrollado con la arena de fundición gastada en la actualidad son ^[48]:

En concreto de asfalto: En algunos casos se ha sustituido hasta un 15% de arena gastada para la fabricación de concreto en asfalto convencional.

Abono como aditivo: Se ha reemplazado la arena gastada como un agente de carga o abono para diferentes aplicaciones como en patios y en tierras vegetales.

En concreto: Se ha sustituido el 30% de arena gastada por arena virgen para la fabricación de muros estructurales que sirvan como prevención en las carreteras.

Ladrillos y adoquines: Se ha utilizado la arena gastada con cierto porcentaje de reemplazo para la fabricación de estos materiales beneficiando el costo de los mismos.

Relleno fluido: Para esta aplicación se ha sustituido un porcentaje de arena regular por el reemplazo de arena gastada, utilizándola como compactación y nivelación y aplicándola como relleno en carreteras, zanjas y alcantarillado.

CAPÍTULO IV



CEMENTO PÓRTLAND

4.1 Origen del cemento Pórtland.

El concreto más antiguo descubierto data cerca de 7000 AC y se encontró en un piso de concreto en Galilea, Israel. Este concreto fue preparado principalmente con una mezcla de caliza calcinada (cal viva) y piedras. Aproximadamente en el 2500 AC, se empleó un material cementante para la construcción de la gran pirámide en Giza, Egipto, el cual fue obtenido en base a un mortero de cal y sulfato de calcio. En el 500 AC, el arte de la producción de morteros a base de cal llegó a la Grecia antigua, los griegos usaban materiales a base de cal como aglomerantes (cementantes) entre piedras y ladrillos, además como material para una capa de revestimiento de calizas porosas normalmente usadas en la construcción de sus templos y palacios. Vestigios de concreto en el antiguo imperio romano, datan de 300 A.C, La palabra concreto es derivada del latín “concretus”, que significa “crecido junto” o “compuesto”.

Durante el siglo II a.c, los romanos mejoraron las propiedades del concreto de cal mediante la adición de cenizas volcánicas (puzolanas naturales). El material empleado fue una ceniza volcánica fina, que contenía sílice y alúmina, las cuales combinadas químicamente con la cal, producen lo que hoy en día conocemos como cemento puzolánico (un tipo de cemento adicionado o compuesto).

4.2 Proceso de producción del cemento Pórtland.

El proceso de fabricación del cemento Pórtland consiste esencialmente en la molienda y el mezclado en ciertas proporciones, de la materia prima que posteriormente es quemada en hornos rotatorios industriales a una temperatura aproximada de 1400 °C, a esta temperatura, el material se sintetiza y se fusiona parcialmente en partículas redondas conocidas como clínker, entonces el clínker es enfriado y molido a polvo fino con algo de yeso (sulfato de calcio).

El producto resultante es el cemento Pórtland comercial tan ampliamente usado alrededor del mundo ^[49]. El cemento Pórtland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente de silicatos de calcio hidráulicos. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferro aluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final.

Los componentes básicos para la fabricación del cemento Pórtland son el óxido de calcio, óxido de sílice, alúmina y el óxido de hierro. La materia prima necesaria para tener las cantidades correctas de los componentes básicos es una mezcla de materiales calcáreos (piedra caliza) y arcillosos. Para la fabricación del cemento Pórtland es necesario buscar depósitos de roca para asegurar que tengan las características necesarias para obtener un cemento de buena calidad.

La cal es el componente que se encuentra en mayor cantidad en el clínker del cemento Pórtland y su origen se debe a la descomposición del carbonato de calcio por medio del calor. El cemento puede ser fabricado tanto por vía seca como por vía húmeda. Mediante desarrollos tecnológicos recientes se puede mejorar considerablemente la productividad y la eficiencia energética de las plantas con proceso seco. Después del mezclado, se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno. La harina cruda pasa a lo largo del horno en velocidad controlada por la inclinación y rotación del horno. El combustible (carbón, gas natural, aceite nuevo o reciclado, neumáticos y subproductos) se fuerza hacia la parte interior del horno donde las temperaturas de 1400 a 1550 °C cambian químicamente la harina cruda en clínker, esferas grises con un tamaño predominante al de las canicas. Después de esto el clínker se enfría y pulveriza. Durante este proceso, se adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado (endurecimiento) del cemento y para que se mejoren las propiedades de contracción (retracción) y el desarrollo de resistencia mecánica. En el molino, el clínker se muele tan fino que puede

pasar, casi completamente, a través de un tamiz (cedazo) de 45 μm (malla # 325). Este polvo gris extremadamente fino es mejor conocido como cemento Pórtland.

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados, finos y gruesos, como piedra triturada, piedra machacada (semi-triturada), pedrejón (piedra redondeada o piedra de río) u otro material granular, la pasta actúa como adhesivo y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y usado en el mundo.

La hidratación empieza cuando el cemento entra en contacto con el agua. En la superficie de cada partícula de cemento se forma una capa fibrosa que gradualmente se propaga hasta que se enlace con la capa fibrosa de otra partícula de cemento o se adhiera a las sustancias adyacentes. El crecimiento de las fibras resulta en rigidización, endurecimiento y desarrollo progresivo de resistencia. La rigidización del concreto puede reconocerse por la pérdida de trabajabilidad, la cual normalmente ocurre después de 3 horas de mezclado, pero es dependiente de la composición y finura del cemento, de cualquier aditivo usado, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura. Consecuentemente, el concreto fragua y se endurece. La hidratación continúa desde que existan condiciones favorables de temperatura y humedad (curado) y espacio disponible para la formación de los productos de hidratación. A medida que la hidratación continúa, el concreto se vuelve más duro y resistente. El curado es la mantención de la temperatura y del contenido de humedad satisfactorios, por un periodo de tiempo que empieza inmediatamente después de la colocación (colado) y del acabado, para que se pueda desarrollar las propiedades deseadas del concreto endurecido, como una

mayor durabilidad, resistencia mecánica, impermeabilidad, resistencia a la abrasión, estabilidad adimensional, resistencia a congelación, deshielo y descongelantes (sales). La calidad del concreto depende de la calidad de la pasta y del agregado y de la unión entre los dos. En un concreto adecuadamente proporcionado, cada partícula de agregado es completamente cubierta por la pasta y todos los espacios entre las partículas de agregados se llenan totalmente con pasta.

Para cualquier grupo de materiales y condiciones de curado, la calidad del concreto endurecido es fuertemente influenciada por la cantidad de agua usada con relación a la cantidad de cemento. Cuando grandes cantidades de agua son innecesariamente empleadas, diluyen la pasta de cemento (el pegamento del concreto).

Las ventajas de la disminución de la cantidad de agua son:

- Aumento de la resistencia a la compresión y flexión.
- Disminución de la permeabilidad, disminución de la absorción y aumento de la estanquidad (hermeticidad).
- Aumento de la resistencia a la intemperie.
- Mejor unión entre concreto y armadura.
- Reducción de la contracción (retracción) y de los agrietamientos (fisuración).
- Menores cambios de volumen causado por el humedecimiento y el secado.

Cuando menos agua se usa, mejor es la calidad del concreto, si es que la mezcla se puede consolidar adecuadamente. Menores cantidades de agua de mezcla (mezclado) resultan en mezclas más rígidas (secas); pero, con vibración, aún las mezclas más rígidas pueden ser fácilmente colocadas. Por lo tanto, la consolidación por vibración permite una mejor calidad del concreto. Esta técnica es usada en prefabricados, especialmente en la mampostería

vibro-comprimida, dando excelentes resultados.

Tanto las propiedades del concreto fresco (plástico) como del concreto endurecido se pueden cambiar con la adición al concreto de aditivos químicos, normalmente en forma líquida, durante la dosificación. Los aditivos químicos comúnmente se emplean para: el ajuste del tiempo de fraguado o de endurecimiento, la reducción de la demanda de agua, el aumento de la trabajabilidad (manejabilidad), la inclusión de aire y el ajuste de otras propiedades del concreto fresco o endurecido.

Después de terminar el proporcionamiento, dosificación, colado, consolidación, acabado y curado adecuados según las necesidades requeridas, el concreto se endurece y se transforma en un material no combustible, durable, resistente a la abrasión e impermeable y requiere un mínimo mantenimiento para su conservación. Además, el concreto se le puede moldear en una gran variedad de formas, colores y texturas para ser utilizado en un número ilimitado de aplicaciones, es por ello que es uno de los materiales de construcción de mayor uso en el mundo.

4.3 Composición química del cemento Pórtland.

El cemento Pórtland está definido por la norma ASTM C 150-05 ^[50] como un conglomerante hidráulico producido al pulverizar el clínker que consiste básicamente de silicatos de calcio, conjuntamente con una o más formas de sulfato de calcio. El clínker es producido por una mezcla de materiales sintetizados a una temperatura cercana a 1400° C. Los principales óxidos presentes en la materia prima son CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.

En la química del cemento se ha acostumbrado expresar los óxidos y los compuestos principales del clínker utilizando las siguientes abreviaturas ^[49].

Óxido	Abreviatura	Compuesto	Abreviatura
CaO	C	3CaO. SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO. SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO. SiO ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO. Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	Ca(OH) ₂	CH
SO ₃	S	4CaO. 3Al ₂ O ₃ .SO ₃	C ₄ A ₃ S
H ₂ O	H	3CaO. 2SiO ₂ . 3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
		CaSO ₄ .2H ₂ O	CSH ₂

La composición teórica o potencial de los compuestos del cemento Pórtland o fases minerales se puede valorar a través de las ecuaciones de Bogue, dichas ecuaciones están incluidas en norma ASTM C 150-05^[50] y suponen que las reacciones químicas de la formación de los compuestos del clínker, han avanzado hasta su equilibrio termodinámico, y que la presencia de impurezas tales como el MgO y los álcalis pueden ser ignoradas ^[49].

El fraguado y el endurecimiento del cemento Pórtland ocurren como un resultado de la reacción de hidratación entre los compuestos del clínker, el yeso y el agua, la cual genera calor que es conocido como calor de hidratación. Estas reacciones se producen a diferentes tasas de velocidad y están influenciadas unas con otras.

Las fases del cemento Pórtland que se encuentran son:

- **Alita:** Solución sólida de silicato tricálcico (C₃S) dopado con impurezas iónicas.
- **Belita:** Solución sólida de silicato dicálcico (C₂S) dopado con impurezas iónicas.
- Solución sólida de **aluminato tricálcico** (C₃A)
- **Ferrita.** Ferro aluminato de calcio (C₄AF)
- Oxido de calcio libre (CaO)

- Sulfatos alcalinos
- Sulfato de calcio en forma de anhidrita, hemihidrato o dihidrato.
- Agua de mezclado.

El **C₃S** y **C₂S** son dos fases de silicatos cristalinos, teniendo a las fases C₃A y C₄AF como fases intersticiales, así mismo se tienen algunas impurezas como la periclasa (MgO), cal viva (CaO) y sulfatos alcalinos (Na₂SO₄ y K₂SO₄)^[49]. Es importante mencionar que las diversas etapas de producción del clínker tienen un papel determinante en la reactividad del material, ya que por ejemplo la viscosidad de la fase intersticial en la zona de sinterización define la dispersión del C₃S y C₂S o las concentraciones de ellos en alguna área específica del clínker. Por otra parte la temperatura en la zona de clinkerización y el gradiente térmico de enfriamiento tienen un efecto en la cristalinidad del C₃A y C₄AF.

La **alita** es la fase principal y la más importante del cemento Pórtland, debido a que controla el fraguado y el endurecimiento. Su hidratación es rápida pero varía en función de la cantidad de iones en solución que contenga.

La **belita** puede existir en cinco formas estructurales diferentes, la forma más importante en la química del cemento es la β-C₂S se hidrata mucho más lentamente que la alita. La alita como la belita producen los mismos tipos de **silicatos de calcio hidratados** (C-S-H) y son las principales fases generadoras de la portlandita (Ca(OH)₂), la cual es la base de la reacción puzolánica.

El **C₃A** normalmente tiene una estructura cubica, sin embargo a mayores cantidades de álcalis puede tener modificaciones a ortorrómbica o monoclinica. Dicha fase es la que genera mayor calor de hidratación y ésta depende también de la cantidad y calidad de los iones alcalinos que se encuentran en su estructura^[49]. La hidratación de esta fase es también afectada por la disolución de los sulfatos presentes.

El **C₄AF** forma productos similares a los del C₃A, donde el hierro sustituye parcialmente la alúmina en la estructura del cristal de etringita y monosulfoaluminato hidratado.

El **yeso** es añadido al cemento Pórtland para controlar el tiempo de fraguado, para mantener una estabilidad volumétrica y en una proporción adecuada para desarrollar en la pasta de cemento Pórtland la máxima resistencia mecánica a la compresión.

EL **C₃A** en la presencia de sulfato de calcio se transforma en etringita (C₃A.3CaSO₄.32H₂O). La primera capa de etringita se precipita en la superficie del grano de C₃A y será un obstáculo impermeable para evitar la hidratación adicional del mismo, sin embargo, en el avance de la hidratación, la etringita puede ser transportada y colocada fuera de la partícula de C₃A, haciendo que se pierda consistencia de la pasta de cemento. Por otro lado la cantidad máxima permitida de sulfato en el concreto depende de muchos factores, incluyendo el contenido de C₃A, la temperatura de curado, el tamaño de las partículas del yeso y la presencia de cloruros en la mezcla, si excedemos esta cantidad, la generación de etringita puede causar expansión y agrietamientos en el concreto ^[49].

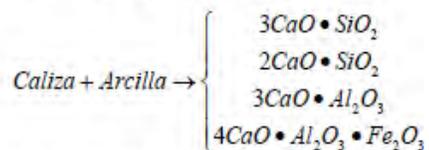
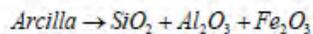
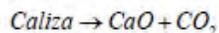
El C-S-H es la principal fase de hidratación y la responsable de la resistencia mecánica de las pastas del cemento, es similar al producido en las reacciones individuales de C₃S y C₂S y exhibe poca cristalinidad, en su estructura pueden quedar embebidos iones como Mg, Al²⁺, K³⁺, Na⁺ o SO₄⁻².

Una parte del total del óxido de magnesio (MgO) presente en el cemento (hasta un 2%) puede entrar en la solución sólida de varios compuestos, y el resto permanece puro en estado cristalino, llamado periclasa. La hidratación de la periclasa a hidróxido de magnesio es lenta y expansiva, bajo ciertas condiciones puede causar insinidad (agrietamiento y desprendimiento de los

productos del cemento). El óxido de calcio libre (CaO) o sin combinar rara vez está presente en cantidades significativas en el cemento Pórtland. El CaO expuesto a altas temperaturas en el horno del cemento se hidrata lentamente y la reacción de hidratación es capaz de causar insinidad en los productos del cemento Pórtland.

La cantidad total de álcalis se expresa en Na₂O equivalentes, los cuales varían de 0.3 a 1.5%. Los sulfatos en el horno del cemento provienen de los combustibles y, dependiendo de la cantidad disponible de azufre, pueden estar presentes en clinker de cemento portland como dobles-sulfatos solubles de álcalis, como la langbenita (2CS·NS) y la aftitalita (3NS·KS). Por otro lado, la fuente de la mayoría del trióxido de azufre (SO₃) presentes en el cemento portland ordinario, es el sulfato de calcio adicionado al clinker durante su molienda. El contenido óptimo de yeso en el cemento está determinado generalmente, por la cantidad a la cual alcanza la resistencia máxima del cemento y donde la contracción sea mínima. Los sulfatos retardan el fraguado rápido ocasionado por la alta reactividad de la fase del C₃A; además, incrementan la solubilidad de los compuestos de silicatos de calcio acelerando la hidratación de la alita.

Ecuaciones de Bogue:



$$C_3S = 4.071(\% \text{CaO}) - 7.600(\% \text{SiO}_2) - 6.718(\% \text{Al}_2\text{O}_3) - 1.430(\% \text{Fe}_2\text{O}_3) - 2.852(\% \text{SO}_3)$$

$$C_2S = 2.867(\% \text{SiO}_2) - 0.7544(\% C_3S)$$

$$C_3A = 2.650(\% \text{Al}_2\text{O}_3) - 1.692(\% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$C_4AF = 3.043(\% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$Na_2O_{\text{equivalentes}} = Na_2O + 0.64K_2O$$

La portlandita o hidróxido de calcio cristalino es el segundo producto más abundante en las pastas de cemento hidratado y puede ser distinguido fácilmente por medio de microscopía óptica, ya que al precipitarse se presenta en forma de pequeños cristales relativamente largos por toda la matriz de cemento hidratado, la portlandita no aporta ningún beneficio a la resistencia mecánica de la pasta de cemento y puede producir espacios porosos, ya que al no ser hidráulica puede lixiviarse y salir del concreto, por esta razón se busca hacerla reaccionar con la puzolana y convertirla en un producto resistente.

El desarrollo de nuevas tecnologías en la ciencia de los materiales es progresivamente rápido. Los materiales de construcción producidos utilizando compuestos avanzados que forman parte de los ingredientes del concreto de alto comportamiento, han sido bien aceptados en la industria de la construcción en el presente y su uso tiende a ser más común en el futuro.

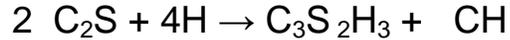
El concreto de alta resistencia y los productos a base de cemento Pórtland de alto comportamiento continuarán haciendo grandes contribuciones para mejorar la calidad y la eficiencia de la construcción de la infraestructura de nuestras comunidades, las cuales deben ser amigables con la naturaleza y desarrolladas sustentablemente.

4.4 Hidratación del cemento Pórtland.

El fraguado y endurecimiento del cemento Pórtland se presenta como resultado de la reacción de los componentes del cemento y el agua. Los componentes mayoritarios del cemento que reaccionan con el agua para producir los productos de reacción son el Silicato Tricálcico (C_3S), el Silicato Dicálcico (C_2S), El Aluminato Tricálcico (C_3A), y el Aluminato Ferrito Tetracálcico (C_4AF). Los productos de hidratación de los dos silicatos de calcio son similares y difieren solo en la cantidad del hidróxido de calcio que se forma como se muestra a continuación:



Silicato tricálcico + agua \rightarrow C-S-H + hidróxido de calcio



Silicato dicálcico + agua \rightarrow C-S-H + hidróxido de calcio

La reacción del C_3A con el agua es muy rápida e involucra reacciones con los iones sulfato suministrado por la disolución del yeso. La reacción puede ser presentada de las siguientes dos maneras.



Aluminato tricálcico + yeso + agua \rightarrow etringita



Aluminato tricálcico + yeso + agua \rightarrow monosulfoaluminato hidratado

El C_4AF forma productos de hidratación similares a los del C_3A , con hierro substituyendo parcialmente a la alúmina en la estructura cristalina de la etringita y del monosulfato hidratado.

Debe admitirse que hoy en día, los detalles del proceso químico que transforma a la pasta de cemento Pórtland en una masa sólida endurecida, no ha sido completamente entendida a detalle en sus diferentes etapas. Diversos investigadores coinciden en que los detalles de las reacciones químicas que tienen lugar en una reacción de hidratación del cemento Pórtland son muy complejos.

CAPÍTULO V



METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.1 Infraestructura empleada.

Este capítulo aborda la metodología experimental empleada en el desarrollo del proyecto de tesis. El desarrollo de este proyecto se realizó mayormente en el Instituto de Ingeniería Civil “Raymundo Rivera Villarreal” (IIC) de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL y en las instalaciones de la empresa Nemark S.A. de C.V. El IIC cuenta con las instalaciones, laboratorios y el personal capacitado necesarios para llevar a cabo el mismo, también, como parte de la metodología se llevaron a cabo algunas pruebas en las instalaciones de la planta CEMEX de Monterrey, con apoyo del personal responsable del manejo de equipos. A continuación se presenta la infraestructura de algunos medios que se emplearon en la investigación:

Laboratorio de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería civil de la UANL.

- Accesorios para la obtención de las densidades de los materiales. Frasco Le Chatelier Marca GILSON SG-24, Keroseno y espátula.
- Mallas para realizar el análisis granulométrico de los agregados. (3/8”, 4, 8, 16, 30, 50,100, 200).
- Mezcladora de morteros con capacidad de 10 L, cumple con la norma ASTM-C-305. Marca HOBART.
- Balanzas analíticas con capacidad de 4 kg. Marca OHAUS, modelo Voyager.
- Cuarto de colado con temperatura y humedad controlada.
- Cortadora de disco de diamante para concreto. Marca PARAMOUNT, modelo FR-D-122.
- Área para acopio, clasificación y almacenamiento de los materiales y cementantes.
- Desecadores de vidrio.

Laboratorio de Investigación en Materiales de Construcción del Instituto de Ingeniería civil de la UANL.

- Máquina Universal Electrónica Instron. Capacidad 60 ton.
- Máquina de compresión ADR-Auto 2000 Standard de ELE con capacidad de 200 ton.
- Mezcladora para mezcla de morteros con capacidad de 4 L. Marca HOBART.
- Balanzas analíticas con capacidad de 2 kg. Marca SARTORIUS.
- Moldes estándar de bronce para fabricación de cubos.
- Cámara ambiental con temperatura y humedad controlada. Marca THERMO ELECTRON. Modelo 3911. Capacidad 822.95 lts.

Laboratorio de Cemex Planta Monterrey.

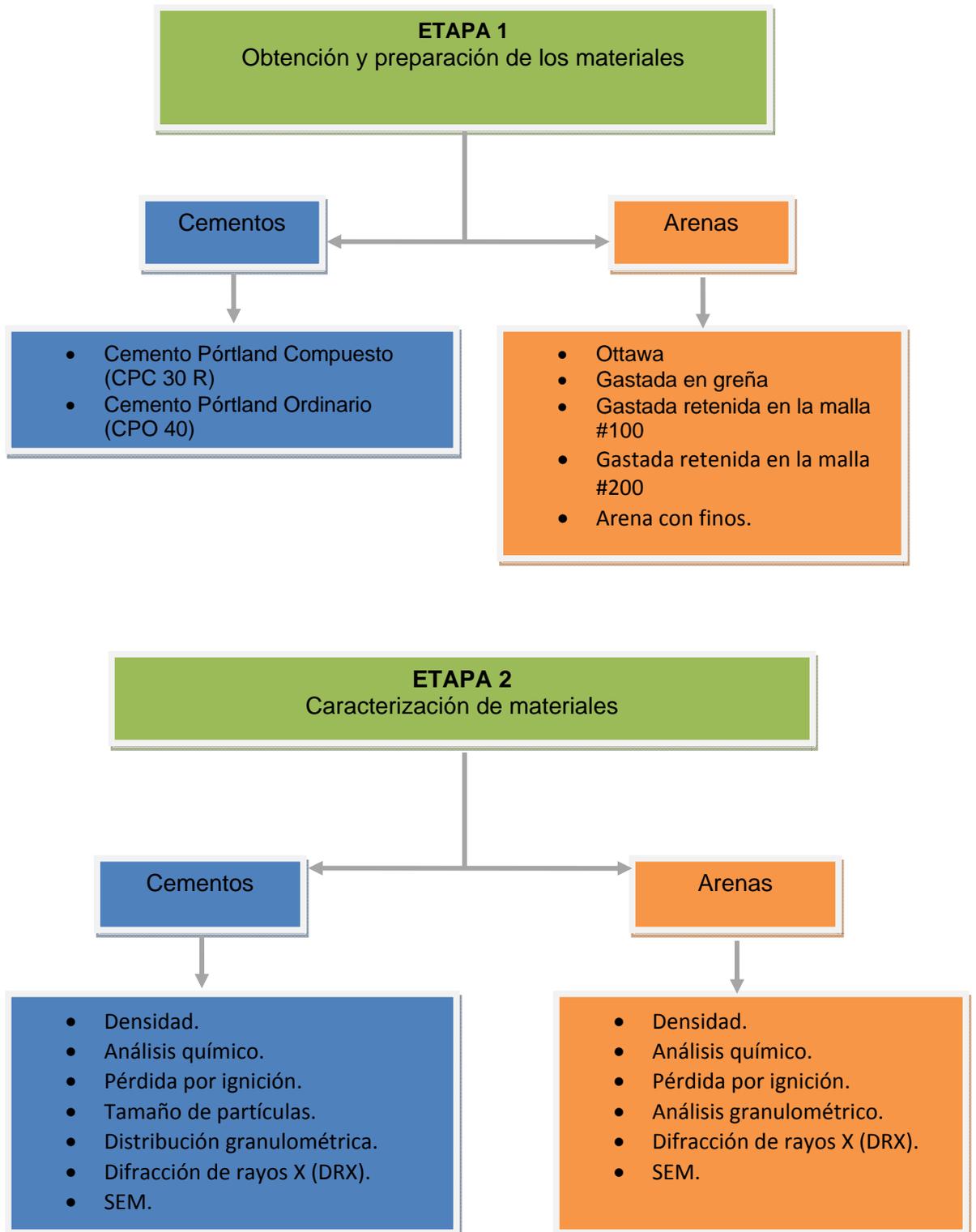
- Mufla: Marca Barnstead 6000 THERMOLYNE 950°C.
- Difracción de rayos X Pert Marca PHILIPS.
- Molino marca Shaterboxs utilizado para moler material y poder fabricar las pastillas de los diferentes materiales.
- Báscula marca Sartorius capacidad 2 kg.

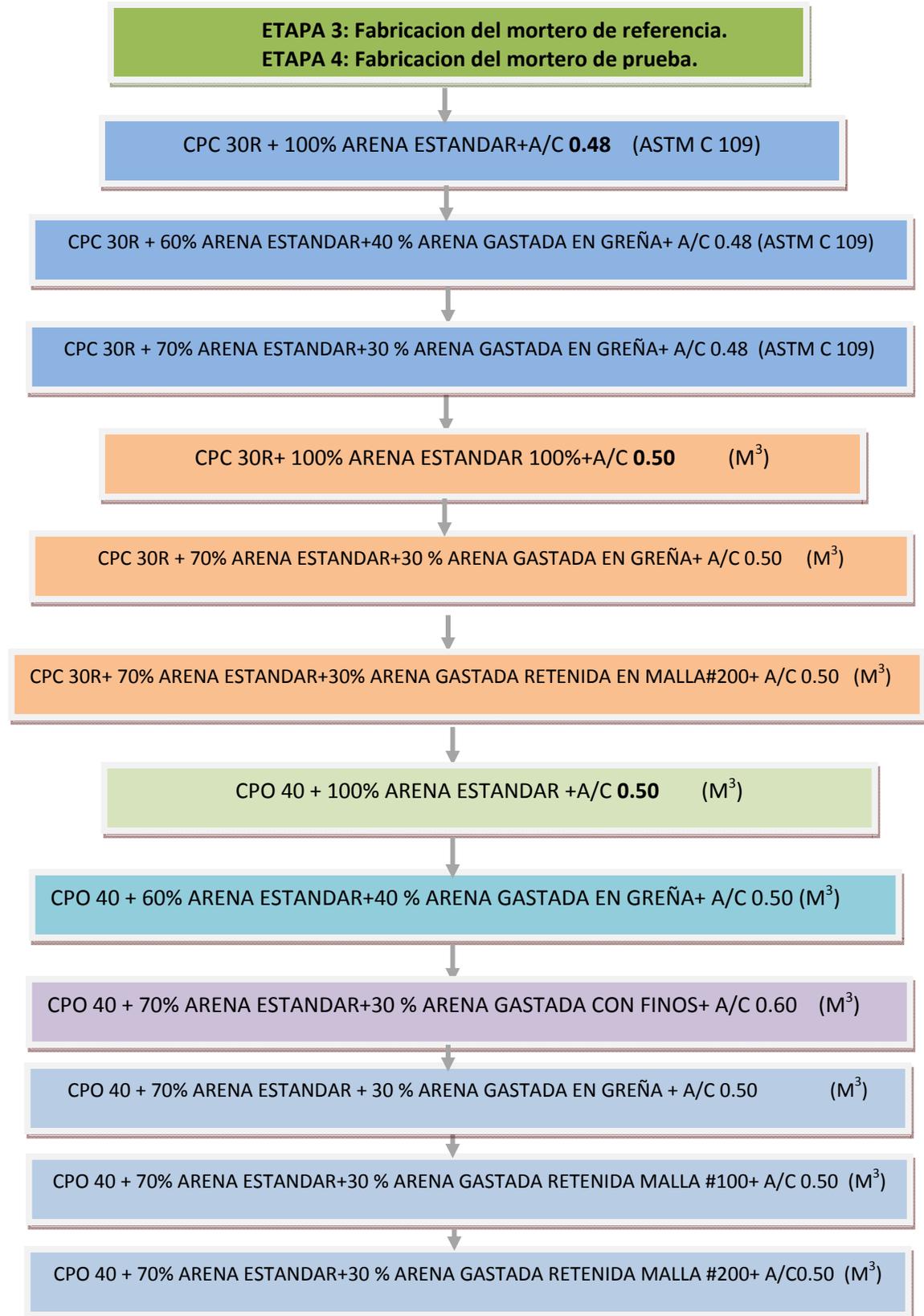
5.2 Metodología experimental.

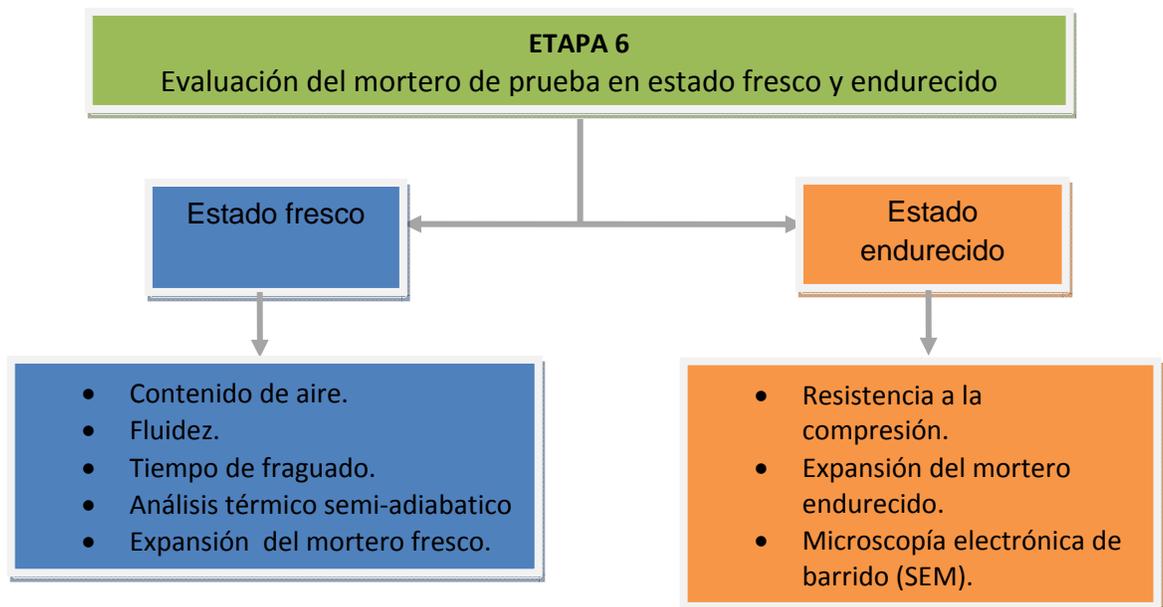
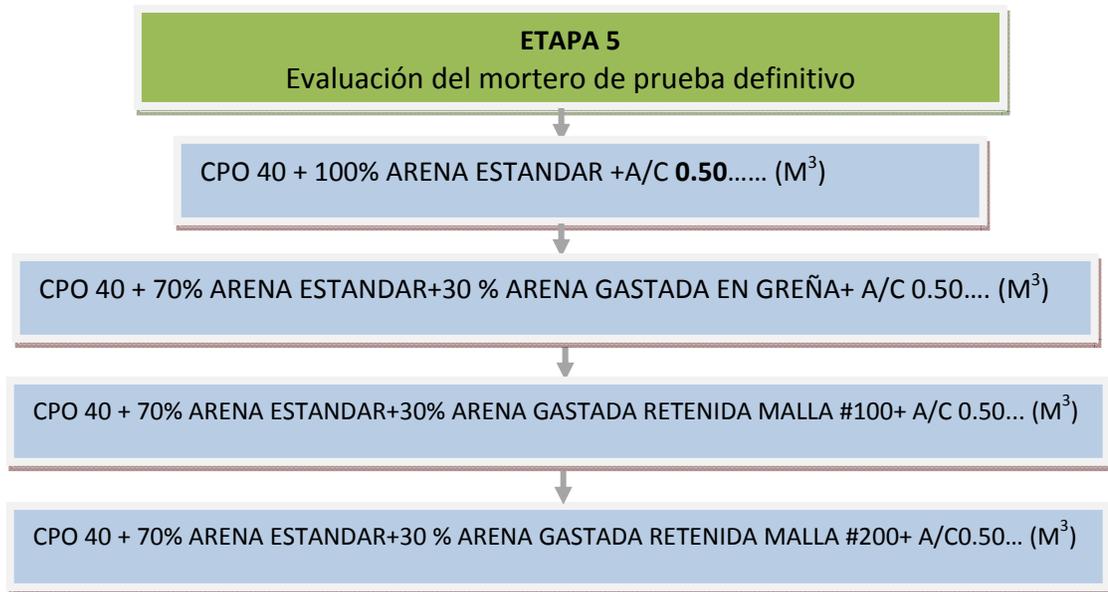
La metodología experimental fué desarrollada en seis etapas para tener un mejor control del avance del proyecto, dichas etapas se muestran a continuación en la **figura 19**:

- **Etapa 1:** Obtención y preparación de los materiales.
- **Etapa 2:** Caracterización de los materiales.
- **Etapa 3:** Fabricación del mortero de referencia.
- **Etapa 4:** Fabricación del mortero de prueba.
- **Etapa 5:** Evaluación del mortero de prueba definitivo.
- **Etapa 6:** Evaluación del mortero en pruebas de estado fresco y endurecido.

Figura 19. Diagrama de la Metodología Experimental.







5.2.1 Etapa 1: Obtención y preparación de los materiales.

En esta etapa se considera la descripción así como, la obtención y preparación de los materiales necesarios para esta investigación.

5.2.1.1 Descripción de los materiales.

5.2.1.2 Material Cementante.

Los materiales empleados en el proyecto de investigación fueron adquiridos en el área metropolitana de Monterrey, incluyendo la arena gastada, la cual fue transportada del municipio de García, Nuevo León.

A continuación se describen las características más importantes de cada uno de los materiales involucrados en la investigación.

El cemento Pórtland está definido por la norma ASTM C 150-05 ^[50] como un conglomerante hidráulico producido al pulverizar el clínker que consiste básicamente de silicatos de calcio, conjuntamente con una o más formas de sulfato de calcio. El clínker es producido por una mezcla de materiales sintetizados a una temperatura cercana a 1400° C. Los principales óxidos presentes en la materia prima del clínker son CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.

En el presente trabajo se utilizó para la metodología experimental final cemento Pórtland ordinario **CPO 40**, de la marca MOCTEZUMA, el cual cumple con los estándares de la norma NMX C 414-03 ^[51] y ASTM C 150-05 ^[50]. El Cemento hidráulico es de color gris oscuro con una finura similar al talco, que al mezclarse con el agua producen una pasta de silicatos de calcio hidratados (C-S-H) que fragua y endurece bajo el agua. Está compuesto por 95-100% de clínker con sulfato de calcio (CaSO₄) y hasta un 5% de adiciones minerales tales como escoria, puzolanas naturales, humo de sílice o filler de caliza ^[48] debe alcanzar una resistencia mecánica a la compresión inicial o temprana, a los 3 días de por lo menos 20 MPa (202 kg/cm²) y a los 28 días, un mínimo de

40 MPa (403 kg/cm²). El lote de cemento fué 200 kg de cemento para la realización de las pruebas.

5.2.1.3 Agregados.

En esta parte se describirá las características de los agregados pétreos empleados en el proyecto: arena de sílice estándar, arena gastada (en greña), arena gastada retenida en la malla # 100 y retenida en la malla # 200.

- **Arena de sílice (AS)**

Está compuesta por granos naturalmente redondeados de cuarzo (SiO₂) de alta pureza, los cuales son inertes y no tienen absorción. Se empleó arena estándar importada de Ottawa, Illinois, USA. Esta arena esta graduada y cumple con la norma ASTM C 778-04^[53], en sacos de 22 kg.

- **Arena gastada (AG)**

Esta arena es llamada así debido que en la fabricación de moldes en los cuales se vierte el aluminio fundido una vez que ha sido solidificado, estos moldes son destruídos y depositados en grandes bancos de arena, como consecuencia del uso en fundición pierde sus propiedades mecánicas y al ser desechada es mezclada con diferentes tipos de residuos orgánicos e inorgánicos. Esta condición no contempla ningún tipo de acondicionamiento por lo que se le conoce como arena en greña, **(figura 20)**.



Figura 20. Arena gastada “en greña”. Utilizada para la fabricación del mortero.

- **Arena gastada retenido malla # 100 (AG100)**

A esta arena se le realizó un acondicionamiento, cribando por la malla # 100. Para la fabricación de los especímenes de mortero se utilizó el retenido en la malla #100, **ver figura 21**. La malla #100 solo forma parte del procedimiento experimental inicial o exploratorio debido a resultados que serán comentados posteriormente.



Figura 21. Arena gastada retenida en malla # 100. Utilizada para la fabricación del mortero.

- **Arena gastada retenido malla # 200 (AG200)**

A esta arena se le realizó un acondicionamiento, cribando por la malla # 200. Para la fabricación de los especímenes de mortero se utilizó el retenido en la malla, **ver figura 22.**



Figura 22. Arena gastada retenida en malla # 200. Utilizada para la fabricación del mortero.

- **Almacenaje de materiales**

Los materiales fueron llevados al Laboratorio del Departamento de Tecnología del Concreto y al Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción de la UANL, se registraron e identificaron, para tener un control adecuado respecto al acomodo, ordenamiento y consumo de los mismos.

El cemento Pórtland fué resguardado en un ambiente aislado de la humedad, la arena gastada (greña), arena gastada retenida en la malla # 100 y malla #200, fué colocada en recipientes herméticos para protegerlos de la humedad ambiental. La arena de sílice estándar fue almacenada y protegida en un lugar con las condiciones ambientales controladas.

5.2.2 Etapa 2: Caracterización de los materiales.

Los materiales se caracterizaron para obtener sus propiedades físicas, químicas así como su caracterización microestructural. Esto es necesario para diseñar y producir adecuadamente los morteros. Dichas propiedades se obtuvieron en base a métodos de prueba estándar establecidos por la ASTM y se mencionan a continuación.

5.2.2.1 Caracterización del Material Cementante CPO 40

5.2.2.2 Densidad

Se determinó utilizando el frasco de Le Chatelier con keroseno y siguiendo el método descrito en la norma ASTM C 188-04 ^[54]. Se emplea este líquido, ya que es inerte con los cementantes hidráulicos.

En la **figura 23**, se presenta el Frasco de Le Chatelier que es un recipiente de cristal de forma definida por la norma ASTM C 188-04. Este recipiente se llena de keroseno cuyo peso específico sea menor a 1 g/cm^3 . Se debe llenar el matraz hasta un punto comprendido entre las marcas 0 mL y 1 mL. Luego se sumerge el matraz en el baño de agua de temperatura constante donde permanecerá hasta que su contenido haya alcanzado la temperatura del agua. Se efectúa la primera lectura, registrando el volumen estabilizado y evitando variaciones en la temperatura del líquido mayores a $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se pesa una porción de masa, de cemento 64 g y se le agrega al líquido contenido en el matraz teniendo cuidado de evitar salpicaduras y que el cemento se adhiera a las paredes interiores del matraz en la parte sobre el nivel del líquido. Se hace girar el matraz en una posición inclinada hasta que termine el desprendimiento de burbujas de aire. Después se registra el volumen final (V2), después de haber dejado sumergido el matraz en el baño de temperatura ambiente. La diferencia $V2 - V1$ es el volumen del líquido desplazado por el peso del cemento usado en el ensayo.



Figura 23. Frasco de Le Chatelier. Para obtener densidad del cemento.

5.2.2.3 Análisis químico

Para fabricar las pastillas se molió primeramente el material, ya que los granos de arena eran de una granulometría mayor a lo requerido para hacer las pastillas de vidrio. Para esto se utilizó un molino de la marca Shaterboxs para moler la cantidad necesaria para la formación de las pastillas, **(figura 24)** y una báscula de la marca Sartorius, **(figura 25)**. Los análisis químico cualitativo y cuantitativo de los materiales de prueba, se realizaron utilizando pastillas de vidrio, para lo cual fue necesario utilizar y un equipo tipo prensa de Spex 3630 marca X-Press, **(figura 26)**. Para la formación de los especímenes de prueba.



Figura 24. Molino de la marca Shaterboxs, utilizado para moler el material para la formación de las pastillas.



Figura 25. Bascula marca Sartorius, utilizada para pesar el material para la formación de las pastillas.



Figura 26. Equipo Spex 3630 marca X-Press utilizado para formar las pastillas para determinar el análisis químico.

El procedimiento con el cual se prepararon las pastillas fué el siguiente.

1. Se pesan 0.06 g de ácido esteárico y se adiciona 0.3 g de natrasol mas la adición de 6 g de muestra. Se coloca en el recipiente los materiales y se realiza la molienda en el molino Shaterboxs, por un tiempo de 3 minutos.
2. Se pesan 5 g de material molido y se coloca en el molde para pastillas. Se coloca el molde en la prensa.
3. Se aplica una presión de 5 ton y se realiza vacío. Se deja que la carga llegue a 15 ton y se retira la carga sin dejar el vacío.
4. Volver a colocar el seguro y llevar a 15 ton de nuevo con el vacío. Quitar el seguro para bajar la carga a 0. Activar de nuevo el seguro y al llegar a 5 ton, apagar la bomba de vacío.
5. Se repite el ciclo anterior solo que la carga final se reduce a 5 ton en vacío. Se saca el molde para retirar la pastilla sin tocar las superficies de tal forma que no se contamine el espécimen.
6. Se elimina el exceso de polvo de la pastilla e identifica. Esta se tiene que conservar en un lugar seco y seguro para poder ser analizada.

Finalmente, para realizar el análisis químico de estos materiales se utilizó un espectrofotómetro de rayos X modelo PW-2400 X Ray de la marca PHILIPS, el cual se presenta en la **figura 27**.



Figura 27. Equipo espectrometro de rayos X modelo PW-2400 X Ray de la marca PHILIPS, utilizado para la determinación del análisis químico de los materiales.

5.2.2.4 Pérdida por ignición (L.O.I)

Se determinó siguiendo el método descrito en la norma ASTM C 114-04 ^[55]. Este método consiste primeramente en colocar en la mufla los crisoles vacíos de aluminio durante un tiempo de 5 a 10 min a una temperatura de 950 °C, (**figura 28**), posteriormente se sacan y se pesan obteniendo el peso de referencia, P1, se coloca 1g de material en cada uno de los crisoles y se pesa nuevamente, P2, después se colocan los crisoles de nuevo en la mufla a 950 °C durante un tiempo aproximado de 30 a 45 min. Transcurrido el tiempo se sacan los crisoles y se pesa cada uno para obtener el peso final, P3.

La fórmula para calcular el L.O.I es:

$$\% \text{ L.O.I} = \frac{(P2) - (P3)}{(P2) - (P1)} \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

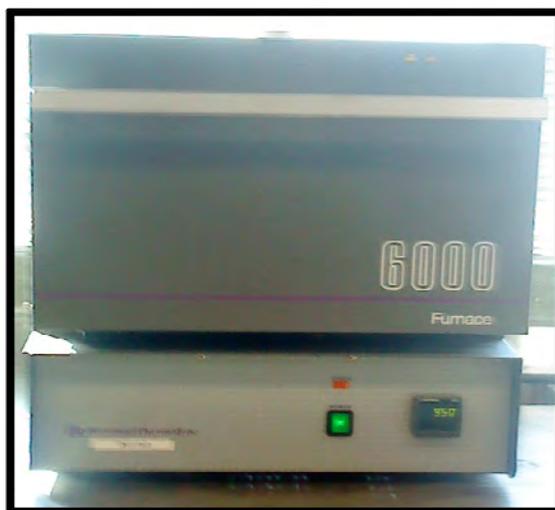


Figura 28. Mufla marca Barnstead 6000 Thermolyne 950 °C, utilizada para colocar los crisoles de aluminio y obtener el L.O.I.

5.2.2.5 Fases minerales.

La difracción de los rayos X es el fenómeno físico a través del cual se manifiesta la interacción fundamental de los rayos X con los cristales. Los rayos X interactúan con la materia a través de los electrones que la forman y que se están moviendo a velocidades mucho menores que a la de la luz. Cuando la radiación electromagnética X alcanza un electrón cargado este se convierte en fuente de radiación electromagnética secundaria dispersada.

La cristalografía estructural por difracción de rayos X, consiste en medir las intensidades de la mayor cantidad posible de haces difractados del espectro tridimensional de difracción, obtener de ellas los módulos de los factores de estructura y de sus valores, mediante algún procedimiento de asignación de fases a cada uno de estos factores, reconstruir la distribución electrónica en la celda elemental, cuyos máximos corresponderán a las posiciones atómicas.

Se determinaron las fases minerales utilizando la técnica de DRX en polvos y equipo X Pert de la marca PHILIPS, el generador se fijó en 35 kV y 25 mA y la longitud de onda de la radiación estándar $\text{CuK}\alpha$ (λ) fué 1.5418 Å. **(figura 29).**

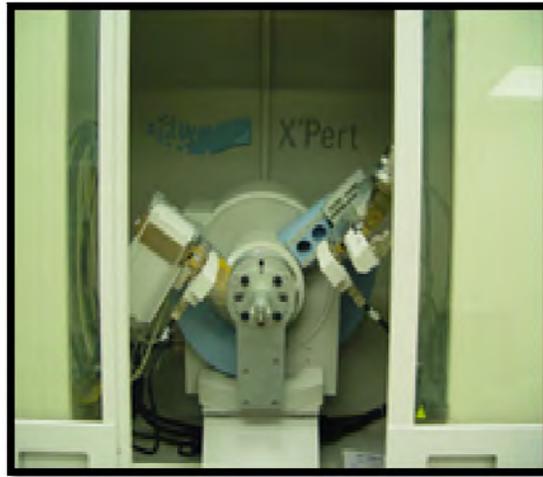


Figura 29. Equipo difractómetro modelo Xpert marca PHILIPS.

La velocidad de ejecución de la prueba fue de $0.025^\circ 2\theta$ por segundo y la rotación del goniómetro se fijó en 30 R. P. M, teniendo el espectro respectivo de cada material se realizó la búsqueda comparativa con los estándares de las diferentes fases minerales utilizando la base de datos de ICDD (International Centre for Diffraction Data) ^[56].

5.2.2.6 Tamaños de las partículas.

La determinación del tamaño de las partículas presentes en las materias primas utilizadas en la experimentación fué realizada mediante el uso de difracción de rayo láser ^[57]. Esta prueba se realizó en las instalaciones de la empresa CEMEX y se determino el porcentaje de volumen retenido al 10, 50 y 85 % del CPO, **(figura 30)**.



Figura 30. Equipo Malvern Mastersizer 2000, para obtener el tamaño de partículas del cemento CPO 40.

5.2.2.7 Área superficial específica.

Se empleó el equipo de Adsorción de Nitrógeno marca Quantachrome modelo Nova 200e. La prueba se llevó a cabo haciendo vacío por un promedio de 20 horas a 100 ° C y utilizando el método del análisis BET sobre las isotermas de adsorción y desadsorción.

5.2.2.8 Observación morfológica.

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM), marca JEOL, el cual se observa en la **figura 31**. Se prepararon los especímenes realizando un corte de 2.5 cm X 2.5 cm X1.5 cm de largo. Cada espécimen fue colocado durante un tiempo de 24 horas en el horno de secado a una temperatura constante de 60° C. Una vez retirado el espécimen del horno fue puesto en el desecador de vidrio, (**figura 32**). Antes de ser analizado el espécimen en el SEM, fué colocado nuevamente en el horno durante un tiempo de 15 minutos a una temperatura de 60 ° C y se recubrió las partes laterales del espécimen de papel aluminio y la parte que se analizó fué recubierta de oro.



Figura 31. Equipo de microscopio electrónico de barrido marca JEOL GSM.



Figura 32. Desecador de vidrio.

5.2.2.9 Agregado estándar.

Se requieren sus propiedades físicas, las cuales se emplearon para diseñar el proporcionamiento de los morteros. En relación a la composición química y mineralógica, se puede mencionar que en trabajos anteriores se han evaluado a los agregados consistiendo básicamente en compuestos estables e inertes con el sistema cementante ternario.

En el caso de la arena de sílice estándar, como se había mencionado anteriormente, este material fue adquirido comercialmente y cumple con la norma ASTM C 778-04 ^[53]. No presenta absorción y tiene una granulometría estandarizada, por lo que solo se le determinó su densidad.

En tanto a la arena gastada (greña), arena gastada retenido en la malla #100 y malla #200, se le realizaron diferentes análisis que se describen a continuación:

5.2.2.10 Densidad y porcentaje de absorción de agua.

Entre mayor sea la cantidad de granos que se puedan unir entre un volumen determinado, mayor será la densidad y más fuerte serán los moldes y corazones. Los granos redondos poseen una buena compactación y pueden proveer una densidad del 8 al 10% mayor que la ofrecida por las arenas angulares. Las densidades y absorciones se obtuvieron mediante el procedimiento de la norma NMX C 165 ONNCCE ^[58].

5.2.2.11 Análisis granulométrico.

Los métodos que se utilizarán para realizar el análisis granulométrico del agregado fino de acuerdo a la NMX son los siguientes:

- Muestreo del agregado de acuerdo a la norma NMX C 30 ONNCCE ^[59].
- Reducción de la muestra respecto a la norma NMX C 170 ONNCCE ^[60].
- Análisis granulométrico de acuerdo a la norma NMX C 077 ONNCCE ^[61].

5.2.2.12 Procedimiento para la fabricación de especímenes de mortero.

Para este proyecto se consideró utilizar cubos estándar de 5 cm, los moldes utilizados para producirlos se muestran en la **figura 33**, con los cubos se obtuvieron las resistencias mecánicas a compresión y fueron tomadas como base en la evaluación del desempeño de proporcionamientos de arena gastada.



Figura 33. Moldes de cobre para producir cubos de 5 cm.

Se decidió realizar varias mezclas con dos proporcionamientos diferentes, uno de acuerdo a la norma ASTM C 109 y otro derivado de dicha norma variando la relación A/C en diferentes mezclas, para ello se fabricaron mezclas de referencia con arena de sílice y otras con arena gastada sustituyendo un porcentaje de arena de sílice por arena gastada, las variaciones de A/C fueron 0.48, 0.50, 0.60, esto se realizó para poder reutilizar la arena gastada y tener un mayor porcentaje en el consumo de la misma y así ser aplicada como un material sustentable en la construcción. Estas relaciones de A/C fueron en base a trabajos anteriores realizados por investigadores en donde la arena gastada provenía de la industria de fundición ferrosa para poder hacer comparativos estos estudios, además poder utilizar el proporcionamiento estándar dado en ASTM. En la región los concretos con proporcionamiento con relaciones A/C superiores al valor estándar ASTM son de uso muy extendido por lo que el estudio sobre estas condiciones es de gran valor técnico-práctico.

5.2.2.13 Pesaje de materiales.

Los materiales, tanto cementante como agregados y el agua se pesaron siguiendo las cantidades señaladas por los proporcionamientos, para ello se emplearon balanzas electrónicas de 2 y de 4 kg, (**figura 34**).



Figura 34. Bascula analítica marca Sartorius, utilizada para pesar material.

5.2.2.14 Homogenización de los cementantes.

Pesados los cementantes se homogenizaron, esto para promover una adecuada reacción de los mismos al entrar en contacto con el agua. Lo anterior fué realizado mediante la agitación continua y manual de los cementantes dentro de una bolsa de plástico durante 1 a 2 minutos.

5.2.2.15 Preparación del equipo de mezclado.

El equipo empleado para esta labor, es una mezcladora con tres niveles de velocidad, cuya aspa tiene un movimiento en rotación, lo que permite un mejor mezclado del mortero, la mezcladora cumple con las especificaciones de la norma ASTM-C 305-04 ^[62]. En este caso se empleó una mezcladora con capacidad de 4 litros, (**figura 35**) y antes de iniciar el mezclado se humedece la olla, para evitar que se pierda agua de la mezcla al fabricar el mortero.



Figura 35. Mezcladora estándar con capacidad de 4 litros. Utilizada para la fabricación de pastas y morteros.

5.2.2.16 Mezclado del mortero.

Una vez humedecida la olla, se coloca la arena y se le agrega el agua de absorción, se comienza el mezclado en velocidad baja por un minuto, pasado el minuto, se detiene la mezcladora y se vacía el cementante previamente homogenizado, se le adiciona el agua de reacción y se mezcla por otro minuto a la misma velocidad, transcurrido ese tiempo, se detiene la mezcladora y se raspa con una espátula el fondo de la olla durante un minuto, para evitar que se aglomere el cementante en el fondo. Por último se mezcla otro minuto a la misma velocidad. Es recomendable colocar una franela húmeda alrededor de la olla todo el tiempo posible, para evitar que se evapore el agua del mortero y se desborde el material ^[62].

5.2.2.17 Vaciado del mortero.

Antes de vaciar el material en los moldes de acero, se les coloca una pequeña cantidad de vaselina para que al momento de desmoldar los cubos no se adhieran. La medida de los moldes de acero para cubos estándar son de 5 cm. El vaciado del material consiste en dos capas, (**figura 36**), cada capa se compacta 16 golpes, cuatro golpes en cada lado del cubo con una barra de

neopreno. Una vez llenado el cubo con las dos capas, se deja al ras del borde con una espátula hasta quedar uniforme la parte de arriba del cubo.



Figura 36. Vaciado del mortero fabricado en los moldes de cobre.

5.2.2.18 Transporte y curado de la pieza.

La pieza colada está lista para llevarse al sitio de curado, **ver figura 37**, solo hay que tener ciertas recomendaciones en su transporte, hay que recordar que la pieza se encuentra adherida temporalmente sobre la base, así que esta nos proporciona un medio seguro para transportarla, se puede mover la base sin ningún problema, solo evitando inclinarla. Los especímenes fueron curados en un cuarto de curado bajo la norma estándar ASTM C 511-04^[63], dicho cuarto de curado debe tener una temperatura de 23 ± 2 °C y una humedad relativa superior al 80%, una vez curados los especímenes, se desmoldean y son ensayados a las edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días a compresión.



Figura 37. Cuarto de curado estándar a temperatura de 23 ± 2 °C y una humedad relativa superior al 80%, Curado del mortero fabricado.

5.2.3 Etapa 3 – Fabricación del mortero de referencia.

En esta etapa se utilizaron los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales en estudio. Se establecieron los parámetros de diseño de las mezclas de tanteo con el objetivo de definir el mortero de referencia, lo anterior en base a las recomendaciones del ACI 318 (American Concrete Institute) y la PCA (Portland Cement Association). Para evaluar la resistencia mecánica a la compresión de los morteros de referencia se fabricaron cubos utilizando un porcentaje en sustitución del 30% y 40% de arena gastada en greña, de arena retenida en la malla #100 y de arena retenida en malla #200, la relación A/C para dichas pruebas fabricadas fueron 0.48, 0.50, 0.60 con cemento tipo CPC 30R y CPO 40. Al utilizar una relación de A/C de 0.48 de acuerdo a la norma ASTM 109, y agregados con 70 % arena de sílice y 30 % de arena gastada y un cemento tipo CPC 30R, generó un mortero de baja fluidez poco trabajable por lo que se tuvo que cambiar la relación A/C a 0.5 diseñando un nuevo proporcionamiento llamado “M³”. Al inicio de las pruebas exploratorias se fabricaron morteros utilizando un cemento tipo CPC 30R como referencia, pero se descartó debido a que generó baja resistencia mecánica, esto se debió a

que es un cemento mezclado (50-94% clinker) con resistencia mecánica a la compresión mínima de 30 MPa a 28 días, por lo que se decidió utilizar CPO 40, ya que este cemento es ordinario (95% -100 clinker) y genera una resistencia mecánica a la compresión mínima de 40 MPa a 28 días. Los especímenes se curaron a 23 ± 2 °C y 100% H.R. En la **tabla 9**, se muestra el proporcionamiento definido por la norma ASTM C 109 y en la **tabla 10**, se observa el proporcionamiento “M³” el cual siguió las recomendaciones para la fabricación de morteros bajo la norma ASTM C 109, este proporcionamiento maneja un consumo de cemento y agregado fino proporcional al de la norma. El diseño de este proporcionamiento se empleó con una relación A/C de 0.5 y con las densidades correspondientes a los materiales utilizados para la fabricación de los morteros. La relación A/C de 0.5, hizo que los morteros fueran mejor trabajables y que la resistencia mecánica fuera la adecuada. Este proporcionamiento fue empleado para la fabricación del mortero de referencia y para el mortero en el cual se sustituye cierto porcentaje de arena estándar por arena gastada.

Tabla 9. Proporcionamiento definido por la norma ASTM C 109 para mortero de referencia.

MATERIALES	6 ESPECIMENES	9 ESPECIMENES
Cemento, g	500	740
Agregado fino, g	1375	235
Agua, ml	242	359
A/C	0.485	0.485

Tabla 10. Proporcionamiento modificado M³ para mortero de referencia.

PROPORCIONAMIENTO PARA 1m ³ DE MORTERO MODIFICADO M ³	
Cemento, kg	525
Agregado fino, kg	1467
Agua, kg	263
A/C	0.50

5.2.4 Etapa 4 - Fabricación del mortero experimental.

Al igual que en la etapa 3, se utilizarán los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales en estudio. Se establecieron los parámetros de diseño de las mezclas de tanteo con el objetivo de definir el mortero experimental, lo anterior en base a las recomendaciones del American Concrete Institute (ACI) 318 y la Portland Cement Association (PCA). Las relaciones en sustitución de arena gastada que se utilizaron para la fabricación de los morteros se derivaron de la revisión bibliográfica del proyecto de investigación, cabe señalar que en estos trabajos se utilizó arena de fundición ferrosa. En la **tabla 11**, se muestra el proporcionamiento empleado para fabricar el mortero experimental considerando 70% de arena estándar y un 30% de la arena gastada con una relación A/C de 0.5.

Tabla 11. Proporcionamiento para M^3 el mortero utilizando 70% arena de sílice y 30% de arena gastada.

PROPORCIONAMIENTO PARA $1m^3$ DE MORTERO MODIFICADO M^3	
Cemento, kg	525
Arena estándar, kg	1021
Arena gastada, kg	438
Agua, kg	263
A/C	0.50

5.2.5 Etapa 5 – Selección del mortero experimental definitivo.

Con los resultados de los morteros experimentales se seleccionó el mortero experimental definitivo utilizando un cemento tipo CPO 40, 70% de arena de sílice y un remplazo del 30% de arena gastada con una relación A/C de 0.5. El 30% de arena gastada para cada mortero fué material en greña, retenido en malla #100 y en malla # 200 y se le realizaron los siguientes ensayos:

- Dimensiones y sus tolerancias.
- Resistencia mecánica a la compresión.
- Fluidez de $110\pm 5\%$
- Tiempos de fraguado.
- Prueba del análisis térmico del calor de hidratación.
- Prueba para medir la expansión del mortero.
- Prueba del contenido de aire.
- SEM.

5.2.6 Etapa 6 - Evaluación del mortero en pruebas de estado fresco y endurecido.

5.2.6.1- Propiedades en estado fresco:

5.2.6.1.1.- Prueba del contenido de aire del mortero de cemento hidráulico ASTM C 185-04 ^[65].

Este método cubre la determinación del contenido de aire del mortero fresco que contenga cualquier tipo de agregados, ya sean densos, celulares, o de peso ligero. Mide el contenido de aire en la fracción del mortero del concreto, pero no se ve afectado por el aire que pudiera estar presente dentro de las partículas del agregado poroso. Primeramente, se vacía cierto material de mortero sobre el embudo del equipo para medir el aire, se debe mantener una mano en el cuello del medidor y con la otra agitar vigorosamente el medidor de aire, con un movimiento de rotado de 0.25 a 0.50 de giro, por un período mínimo de 1 minuto, **(figura 38)**. El contenido de aire se evaluó con cuatro mezclas diferentes, para ello se fabricó un mortero con el 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice, otra con 30 % de arena gastada retenida en malla #100 y 70 % de arena de sílice, una distinta con 30 % de arena gastada retenida en malla #200 y 70 % de arena de sílice y finalmente un mortero de referencia con el 100% de arena de sílice.



Figura 38. Obtención del contenido de aire. Método volumétrico.

5.2.6.1.2.- Prueba de fluidez del mortero ASTM C 1437-04 ^[66].

Esta prueba describe el método de ensaye para determinar el flujo de un mortero de cemento. La prueba somete un cono truncado de cobre, a 25 caídas de 0.5 pulgadas de altura en una tabla especial de laboratorio. El diámetro de la muestra ensayada es comparado con el diámetro original de muestra cónica. El rango de aceptación es de un incremento del diámetro de $110 \pm 5\%$. Sin embargo, este procedimiento describe una condición de laboratorio, y la cantidad de agua necesaria para llegar a una fluidez de $110 \pm 5\%$ no es suficiente, para producir un mortero con una trabajabilidad adecuada a partir de las materias primas empleadas en este proyecto, **(figura 39)**.

El mortero debe mezclarse preferentemente usando una mezcladora mecánica de eje horizontal, durante un período no menor de 4 minutos. Un tiempo de mezclado menor, puede resultar en un mortero de poca trabajabilidad, con poca retención de agua y con un contenido de aire menor al óptimo. Períodos de mezclado mayores pueden afectar adversamente los contenidos de aire del mortero y pueden reducir la resistencia del mortero. La fluidez del mortero se determinó del promedio de al menos dos mezclas.

La fluidez se evaluó con cuatro mezclas diferentes, para ello se fabricó un mortero con el 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice, otra con 30 % de arena gastada retenida en malla #100 y 70 % de arena de sílice, una distinta con 30 % de arena gastada retenida en malla #200 y 70 % de arena de sílice y finalmente un mortero de referencia con el 100% de arena de sílice.



Figura 39. Obtención de la fluidez del mortero.

5.2.6.1.3.- Prueba de tiempo de fraguado en mezclas de concreto por resistencia a la penetración, Norma ASTM C 403-04 ^[67].

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.

La tiempo de fraguado se evaluó con cuatro mezclas diferentes, para ello se fabricó un mortero con el 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice, otra con 30 % de arena gastada retenida en malla #100 y 70 % de arena de sílice, una distinta con 30 % de arena gastada retenida en malla #200 y 70 % de arena de sílice y finalmente un mortero de referencia con el 100% de arena de sílice. El equipo utilizado para esta prueba fué un penetrómetro con 6 agujas de penetración, utilizando agujas con área de: 1, 1/2, 1/4, 1/10, 1/20, 1/40 in² (**figura 40**).



Figura 40. Prueba de tiempo de fraguado con arena gastada.

5.2.6.1.4. - Análisis térmico semi-adiabático del mortero

- Medición de la temperatura en el mortero ^[68].

La temperatura del mortero se midió con un aparato DATALOGGING de la marca SPER SCIENTIFIC utilizando un termopar tipo K, este fué instalado en un molde de material de aislante con dimensiones de 9 pulgadas de ancho y 20 cm de alto, el análisis de esta prueba fué fabricando un mortero de referencia utilizando 100% arena de sílice, otra con el 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice, una distinta con 30 % de arena gastada retenida en

malla #100 y 70 % de arena de sílice, finalmente una mas utilizando 30% de arena gastada retenida en malla #200 y 70% de arena de sílice.

Las medidas para evaluar esta prueba se pueden realizar en condiciones ambientales o bajo una atmósfera controlada. Para medir la temperatura del mortero se utilizaron termopares, los cuales forman un circuito con dos metales distintos que producen un voltaje que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado “punto caliente” y otro denominado “punto frío”. El análisis de la temperatura de cada mortero evaluado fué comparado con la temperatura ambiente. Este proceso duro aproximadamente 48 horas registrando la temperatura a lo largo de ese tiempo cada 5 segundos, **(figura 41)**.



Figura 41. Análisis térmico del mortero, utilizando equipo marca Sper Scientific datalogging Thermometers.

5.2.6.1.5. - Expansión del mortero.

- Medición de la expansión del mortero ^[68].

Esta prueba se realizó con el fin de encontrar qué porcentaje de expansión se generó en la reacción con el cemento Pórtland y los contenidos variables de C_3A en cada mortero fabricado con arena gastada. Para la evaluación de esta prueba se utilizó un equipo de la marca VISHAY MODEL P3, una computadora para almacenar los datos, unos cilindros de NYLAMID de 9 cm de ancho por 20 cm de largo y dos extensómetros, el arreglo del experimento se presenta en la **figura 42**. Se decidió utilizar cilindros de NYLAMID porque el comportamiento que presentaron durante el análisis de prueba y de acuerdo a la referencia que se obtuvo sobre un trabajo realizado por Holcim para medir la expansión en los morteros era el más adecuado. Esta configuración de prueba fué la que presentó el menor error de acuerdo al uso de otros materiales que fueron sensibles al calor de reacción de los morteros experimentales. La medición de la expansión se llevo a cabo sobre dos cilindros, uno fabricado con 30 % de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice, otro utilizando 30% de arena gastada retenido en malla #100 y 70% de arena de sílice, uno distinto utilizando 30% de arena gastada retenida en malla #200 y 70% de arena de sílice, estas mezclas fueron comparadas con una mezcla de referencia utilizando el 100% de arena de sílice con una relación de A/C de 0.5. El período de prueba para el cambio de longitud fué sondeado durante 48 horas, para poder obtener un conjunto de datos más completo respecto al comportamiento a un corto plazo sobre los morteros. Los datos sobre la expansión fueron registrados en cada una de las muestras fabricadas, usando para ello dos extensómetros digitales, que fueron calibrados antes de cada medición.



Figura 42. Evaluación de la prueba de expansión del mortero fabricado con arena gastada y mortero de referencia.

5.2.6.2. Propiedades en estado endurecido:

5.2.6.2.1.- Prueba de resistencia a compresión ASTM C 109-04 ^[64].

La fabricación y ensaye de los especímenes cúbicos de 5 cm para determinar la resistencia a la compresión se realizó de acuerdo a lo especificado en la norma, esta norma define como obtener la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Los especímenes fueron ensayados a 1, 3, 7, 14 y 28 días de su elaboración. Estos fueron colocados en un recipiente con agua para mantener saturados superficialmente húmedos antes de ser ensayados. La resistencia del mortero a la compresión, obtenida a los 28 días de edad, en especímenes cúbicos de 5 centímetros para el caso de morteros de referencia deberá ser mínimo de 40 N/mm^2 para morteros de referencia 100% sílice. En la fabricación de morteros utilizando un 30 % de arena gastada, se espera tener una resistencia a la compresión a los 28 días de 24 MPa y 28 MPa^[69]. En la **figura 43** se presenta la máquina universal utilizada en las pruebas mecánicas.



Figura 43. Máquina Universal Electrónica Instron, utilizada para ensayar los cubos a compresión.

5.2.6.2.2.- Expansión del mortero endurecido.

Se evaluó el porcentaje de expansión del mortero fabricado, dicha expansión es generada por la reacción del cemento con el aluminio proveniente de la arena gastada, lo que provoca una menor resistencia a la compresión en el mortero y la formación de poros y grietas, en las **figuras 44 y 45** se presenta el mortero expandido en diferentes períodos de curado.



Figura 44. Expansión del mortero minutos después de ser colocado en el molde de cobre.



Figura 45. Expansión del mortero, después de salir del cuarto de curado estándar y ser desmoldados.

5.2.6.2.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB) SEM.

La microscopía electrónica de barrido (MEB) y el microanálisis por energía dispersada de rayos x (MEDRX), son técnicas que permiten el análisis de las muestras de morteros fabricadas para este proyecto de investigación. Los especímenes fabricados para las pruebas de SEM se analizaron a 1, 3, 7, 14 y 28 días respectivamente. Estos especímenes fueron barras de 2.5x2.5x3cm, los cuales fueron sometidas a un procedimiento de preparación de muestras para observar en el MEB que consiste en lo siguiente:

Primero 24 horas a una temperatura de 70 °C y colocados en un desecador de vidrio posteriormente e inmediatamente antes de su análisis los especímenes se colocaron en un horno a 40 °C por 10 min con el objetivo de evaporar la acetona del espécimen. Se recubrieron los especímenes por debajo y por los lados con una pintura de carbón para provocar una superficie conductora en el material. La parte superior del espécimen fue fracturada para que la superficie analizada en el MEB/MEDRX no contuviese algún residuo. Los especímenes fueron recubiertos por una deposición de oro para provocar que la superficie a analizar fuera conductora. Posteriormente, fueron examinadas mediante un microscopio electrónico de barrido modelo JEOL JSM-6490LV, con condiciones de trabajo de 20 Kv como voltaje de aceleración y tamaño de abertura de 50,

ver figura 46. Estos especímenes se obtuvieron de los morteros fabricados con arena gastada en greña, arena retenida malla # 200 y morteros de referencia con 100% arena de sílice, esto con el fin de observar la cantidad de aluminio y algunas partículas orgánicas que afectan la reacción con el cemento.



Figura 46. Microscopio electrónico de barrido (SEM) marca JEOL JSM-6360LV

Las muestras del mortero deben ser sacadas previamente. La principal razón de esto es el elevado vacío que debe ser suministrado a la columna del microscopio para permitir que los electrones primarios migren de su fuente de emisión con una energía suficiente para interactuar con la superficie del mortero y poder dar señales. Estas señales de electrones son generalmente detectadas con detectores de electrones secundarios (SE) y/o electrones dispersos (BSE.) La caracterización micro estructural del mortero se identifica en el análisis de fases cristalinas y transiciones de fases en diversos compuestos adheridos en las muestras del mortero, así como su composición de superficies, tamaño de grano y presencia de defectos como grietas y fisuras.

CAPÍTULO VI



DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6.1 Introducción al análisis de resultados.

En este capítulo se aborda el análisis de los resultados obtenidos al realizar las pruebas experimentales detalladas en la metodología experimental como son, la caracterización de los materiales, diseño del proporcionamiento de las mezclas fabricadas para la elaboración de los morteros con arena gastada, desarrollo de resistencia en compresión, los efectos sobre las propiedades físicas y químicas que causa la temperatura de reacción e hidratación en los morteros fabricados con arena gastada y el cemento Pórtland. También se evaluó la contracción de los morteros debido a la expansión que se generó en cada uno de ellos y se realizó un análisis microestructural de los especímenes fabricados en cada una de las mezclas en el SEM.

El estudio se llevo a cabo en seis etapas.

Etapas 1 - Obtención y preparación de materiales.

Etapas 2 - Caracterización de los materiales.

En esta fase se analizan los resultados obtenidos de las pruebas de caracterización mencionadas en la metodología experimental, los cuales se muestran en dos partes: Cementante y Agregados.

En este caso, inicialmente se analizó la densidad tanto del cemento Pórtland como la arena de sílice y arenas gastadas.

Las etapas siguientes fueron descritas en el capítulo anterior.

- **Etapas 3:** Fabricación del mortero de referencia.
- **Etapas 4:** Fabricación del mortero de prueba.
- **Etapas 5:** Evaluación del mortero de prueba definitivo.
- **Etapas 6:** Evaluación del mortero en pruebas de estado fresco y endurecido.

6.2 Densidad de los materiales

La determinación correcta de la densidad del cemento y agregados juega un papel importante en el diseño de los proporcionamientos de las mezclas de prueba. En la tabla 12 se presentan los resultados de densidad de los diferentes materiales utilizados en el proyecto de investigación que corresponden a un solo tipo de cementante así como, la arena gastada en greña, arena retenida en malla #100 y arena retenida en malla #200. Los valores de las densidades fueron utilizados para el cálculo de las proporciones de las mezclas para producir morteros exploratorios y de prueba.

Tabla 12. Fineza y densidades de los materiales.

Material	Densidad g/cm³
CPO 40	3.05
Arena estándar Ottawa	2.65
Arena gastada en greña	2.60
Arena gastada retenido malla # 100	2.62
Arena gastada retenido malla # 200	2.60

El valor de densidad de cada una de las materias primas examinadas se encuentran dentro de los valores reportados en la literatura, la menor densidad de la arena gastada, aproximadamente 1%, es debido a que esta se encuentra contaminada con otro tipo de elementos distintos al contenido de la arena.

6.3 Distribución de tamaño de partícula del cemento Pórtland.

El análisis de la distribución de tamaños de partículas se basa en el tamaño de partículas que se retienen el 10, 50 y 90%. El resultado aparece en la tabla 13 como $d(0.1)$, $d(0.5)$ y $d(0.9)$ respectivamente, y para ello se utilizaron 150 g de muestra del material evaluado. En la **figura 47** se puede observar la distribución del tamaño de partículas del cemento Pórtland obtenido por el equipo Malvern mastersizer 2000, mediante la técnica de difracción láser.

Tabla 13. Tamaños en los que se retiene el 10, 50 y 90 % del CPO 40. Prueba realizada por medio de difracción láser.

Material	$d(0.1)$, μm	$d(0.5)$, μm	$d(0.9)$, μm
CPO 40	2.39	14.22	35.45

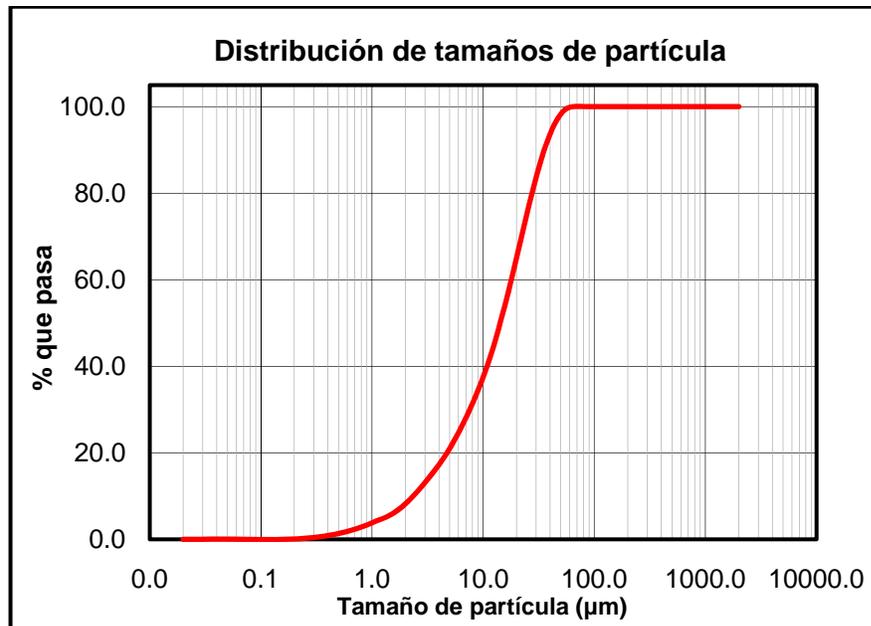


Figura 47. Distribución del tamaño de partícula de CPO 40.

De acuerdo al Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), el desarrollo de resistencia temprana es mejor si al menos 50% de las partículas oscila entre 3 y 30 μm . Específicamente, las partículas menores de 4 μm son muy ricas en SO_3 , y álcalis; las partículas más gruesas que 30 μm contienen una proporción grande de C_2S , mientras que las partículas que se ubican entre 4 y 30 μm son ricas en C_3S . De este modo, podemos decir que el cemento CPO 40 cuenta con una distribución de partículas dentro de los valores medios establecidos en el IMCYC.

6.4 Composición química del Cemento Pórtland.

El análisis químico elemental por la técnica de fluorescencia de rayos X, fué realizado sobre el cemento utilizado como materia prima, el cual debe comprobar la clasificación de acuerdo a NMX C 414-03 ^[51] y ASTM C 150-05 ^[50]. En la **tabla 14**, se muestran los resultados de los análisis químicos del cemento Pórtland ordinario (CPO 40) marca Moctezuma. En esta tabla se muestran valores de SO_3 y la pérdida de peso por ignición ligeramente por encima de la especificación de acuerdo a la norma ASTM C 150-05, pero no así en la NMX-C-414-03. El valor alto de SO_3 puede causar problemas en la pérdida de trabajabilidad del material. La alta concentración de SO_3 se puede deber a la utilización de combustibles ricos en sulfatos durante la producción del clinker de cemento Pórtland ordinario.

La pérdida por ignición se realizó para determinar la prehidratación, la cantidad de yeso o el contenido de polvo de caliza presente en el cemento portland ordinario. Debido a que el cemento Pórtland ordinario fué traído de una planta cementera, hay que considerar que frecuentemente este material contiene polvo de caliza adicionado de un 0 a un 5%, permitido por la norma NMX-C-414-03 ^[51]. Por consiguiente, la adición del polvo de caliza puede ser la causante de que el valor de la pérdida de ignición de 3.2 sea ligeramente superior a lo establecido en la norma ASTM C 150-05 ^[50].

Tabla 14. Composición química del Cemento Pórtland Ordinario 40, % en masa, g.

Composición Química	Límite (% masa)		masa, g
	ASTM C 150	NMX C 414	CPO 40
SiO ₂ , %	-----	-----	19.8
Al ₂ O ₃ , %	-----	-----	4.04
Fe ₂ O ₃ , %	-----	-----	1.83
CaO, %	-----	-----	64.8
MgO, %	6.0 max	-----	1.58
SO ₃ , %	3.5 max	4.0 max	4.35
Perdida por ignición, %	3.0 max	5.0 max	3.04
Na ₂ O, %	-----	-----	0.350
K ₂ O, %	-----	-----	1.32

6.5 Compuestos potenciales del cemento Pórtland.

En la tabla 15, muestran los compuestos potenciales de las fases del cemento Pórtland determinados por las ecuaciones de Bogue (capítulo IV), así mismo, la cantidad total de álcalis expresada en Na₂O equivalentes, fué determinada por las ecuaciones de Bogue.

Las fases C₃S y C₃A son las más reactivas a edades tempranas y al estar presentes en grandes cantidades en el cemento, reaccionarán rápidamente, promoviendo el incremento de las resistencias a edades tempranas. Por otro lado, se espera que el aumento de la resistencia a la compresión después de los 28 días, no sea significativa, ya que contiene una baja concentración de la fase C₂S (<15 %), el cual es el responsable del aumento de la resistencia a edades tardías.

Tabla 15. Compuestos potenciales del cemento, % en masa, g.

Compuestos potenciales	ASTM C 150	NMX C 414	CPO 40
C ₃ S, %	-----	-----	71.15
C ₂ S, %	-----	-----	3.09
C ₃ A, %	-----	-----	7.60
C ₄ AF, %	-----	-----	5.57
C ₄ AF + 2 (C ₃ A), %	-----	-----	20.77
Na ₂ O _{equi} , %	0.6 max	-----	1.19

6.6 Requerimientos físicos del cemento Pórtland.

En la tabla 16, se presentan los requerimientos físicos del cemento. La resistencia a la compresión es alta a las edades tempranas por el alto contenido de las fases **C₃S** y **C₃A**.

Tabla 16. Requerimientos físicos del Cemento Pórtland Ordinario 40 según norma ASTM y la NMX.

Requerimientos físicos	Límite		Resultado
	ASTM	NMX	CPO 40
Área superficial, m ² /kg	280 min	-----	482
Resistencia a la compresión, MPa			MPa
1 día	-----	-----	21
3 días	12.0 min	-----	26
7 días	19.0 min	-----	31
14 días	-----	-----	34
28 días	28 min	40 min	39
Densidad, g/ cm ³	-----	-----	3.05

6.7 Composición química de las arenas gastadas.

Para la composición química de las arenas gastadas, se fabricaron pastillas de vidrio redondas y se evaluaron en un espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X en CEMEX planta Monterrey.

6.7.1 Composición química de la arena gastada en greña.

En la tabla 17 se muestran los resultados de la composición química de la arena gastada en greña, como era de esperarse el porcentaje SiO_2 fué alto, alrededor del 90%, siendo el principal elemento contaminante el aluminio para las dos muestras, destacándose el contenido de aluminio en la muestra de arena gastada en greña con 6.19% y un porcentaje 2.01% de Fe_2O_3 para la arena tamizada. Estos porcentajes afectan las propiedades de los morteros fabricados y se ven reflejados en la reacción que hay entre el cemento y la arena gastada. El contenido de estos elementos químicos afecta el uso de las arenas de fundición no ferrosas.

Se han realizado estudios de toxicidad, en donde las arenas gastadas con cemento has sido depositadas en suelos de acuerdo a un ensayo TCLP (toxicity characteristic leaching procedure), basado en la norma ASTM D 3897-85 ^[71], sin embargo el uso e interpretación de estos resultados debe ser acorde a las regulaciones ambientales vigentes y a las composiciones químicas particulares de los subproductos que las agencias ambientales aceptan dentro de aplicaciones urbanas y/o rurales ^[72, 73].

Tabla 17. Composición química de la arena gastada en greña, % en masa

Composición Química	% en masa, g
	Arena gastada en greña
Na ₂ O	0.260
MgO	0.240
Al ₂ O ₃	6.190
SiO ₂	89.500
P ₂ O ₅	0.038
SO ₃	0.082
K ₂ O	0.170
CaO	0.940
MnO	0.038
Fe ₂ O ₃	2.010
Co ₃ O ₄	0.021
CuO	0.224
ZnO	0.032
SrO	0.000
ZrO ₂	0.022
RuO ₂	0.064
WO ₃	0.239
Au	0.000

6.7.2 Composición química de la arena gastada retenida en malla # 100.

En la **tabla 18**, se reporta el análisis de la composición química de la arena gastada retenida en la **malla #100**, la cual mostró un porcentaje de **SiO₂** alrededor del **92%**, siendo el principal elemento contaminante el **aluminio** con un **4.02%** y un porcentaje **0.98%** de **Fe₂O₃**. El alto contenido de aluminio afecta las propiedades mecánicas del mortero, teniendo una reacción de hidratación con el cemento.

Tabla 18. Composición química de la arena gastada retenido en malla #100, % en masa.

Composición Química	% en masa
	Arena gastada retenido malla # 100
Na ₂ O	0.160
MgO	0.240
Al ₂ O ₃	4.020
SiO ₂	92.500
P ₂ O ₅	0.038
SO ₃	0.081
K ₂ O	0.141
CaO	0.940
MnO	0.038
Fe ₂ O ₃	0.980
Co ₃ O ₄	0.021
CuO	0.224
ZnO	0.032
SrO	0.000
ZrO ₂	0.022
RuO ₂	0.064
WO ₃	0.239
Au	0.000

6.7.3 Composición química de la arena gastada retenida en malla #200.

En la **tabla 19**, se observa el análisis de la composición química de la arena gastada retenida en la **malla # 200**, la cual mostró resultados un porcentaje de **Si₂O** alrededor del **93%**, siendo el aluminio el principal elemento contaminante con un **4.17%** y un porcentaje de **0.97%** de **Fe₂O₃**. De acuerdo a la composición química de la arena gastada retenida en la malla #200, podemos observar que el contenido de aluminio y fierro es un poco mayor al obtenido en la composición química de la malla # 100.

Tabla 19. Composición química de la arena gastada retenido en malla #200, % en masa.

Composición Química	% en masa, g
	Arena gastada retenido malla # 200
MgO	0.160
Al ₂ O ₃	4.170
SiO ₂	93.200
P ₂ O ₅	0.043
K ₂ O	0.102
CaO	0.526
Fe ₂ O ₃	0.970
Co ₃ O ₄	0.030
CuO	0.160
ZnO	0.0230
SrO	0.000
ZrO ₂	0.013
RuO ₂	0.065
WO ₃	0.330
Au	0.000

La importancia de conocer la composición química del agregado reciclado es para orientar al tipo de metodología a utilizar, en función de los elementos y compuestos encontrados en las arenas tal y como, ha sido la experiencia en otros países donde los materiales como subproductos son introducidos en una matriz cementante para fijarlos y evitar la lixiviación ^[74, 75].

6.8 Análisis de fases minerales por DRX del cemento Pórtland.

Las fases mineralógicas del cementante se determinaron en base a los resultados del análisis de difracción de rayos X. En la **figura 48** se muestra el difractograma del cemento Pórtland ordinario, en el cual se identificaron las principales fases minerales del cemento. En el resultado se identificó la fase de yeso adicionada al cemento Pórtland para el control del fraguado. La determinación de las fases del cemento sirve como referencia para efectuar el estudio de la hidratación de las pastas del cemento Pórtland.

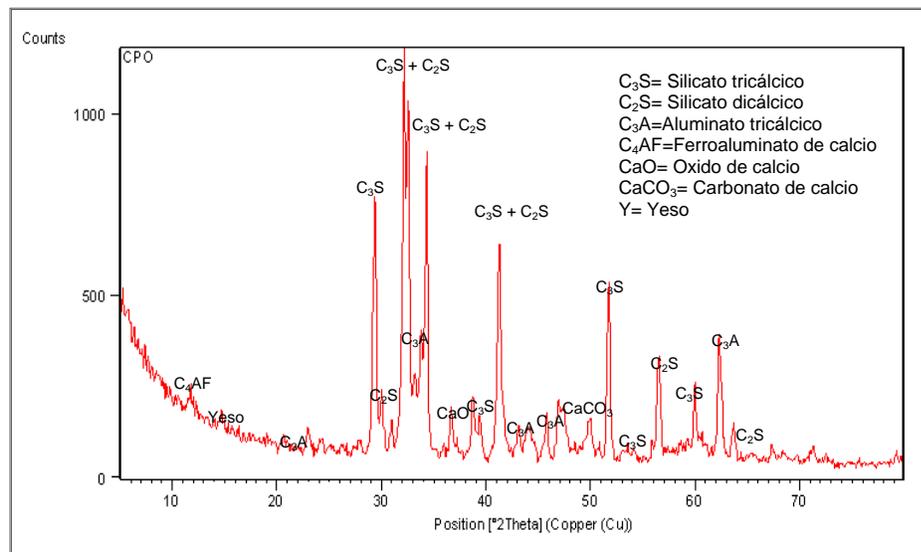


Figura 48. Difractograma de rayos x del CPO 40.

6.9 Fases mineralógicas del cemento Pórtland.

El resumen de las fases mineralógicas del cementante se determinó en base a los resultados del análisis de DRX, y se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Análisis mineralógico.

Material	Fases Minerales
CPO 40	C ₃ S (Alita) C ₂ S (Belita) C ₃ A (Celita) C ₄ AF (Ferrita) Sulfato de calcio en las formas de hemihidrato (CaSO ₄ ½ H ₂ O) y anhidrita (CaSO ₄)

Los resultados obtenidos en el análisis mineralógico, muestran estructuras y concentraciones típicas para un cemento Pórtland ordinario.

6.10 Análisis de fases minerales por DRX de las arenas gastadas.

En lo que se refiere a la arena gastada en greña, arena gastada retenida malla #100 y la arena retenida en la malla #200, se muestran que en las **figuras 49, 50 y 51** respectivamente, los picos principales representan el contenido de sílice y en menor escala se presentan las principales impurezas como el Al Y Fe.

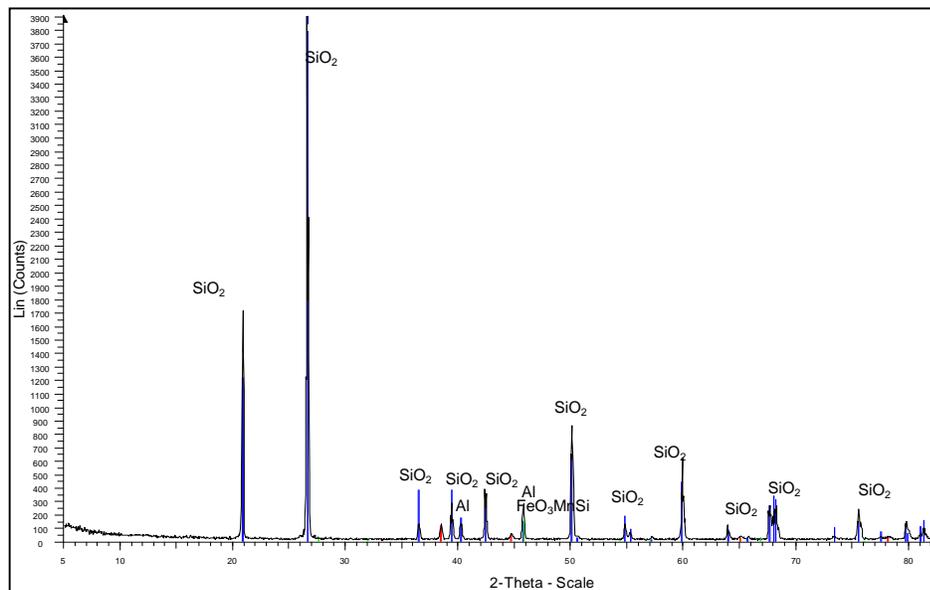


Figura 49. Difractograma de rayos X de la arena gastada en greña.

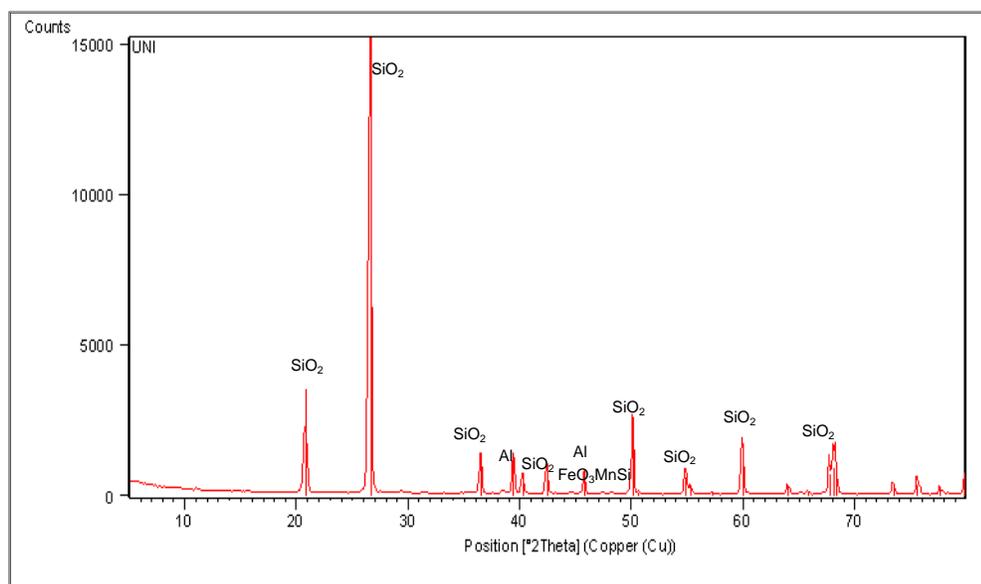


Figura 50. Difractograma de rayos X de la arena gastada retenido en la malla # 100.

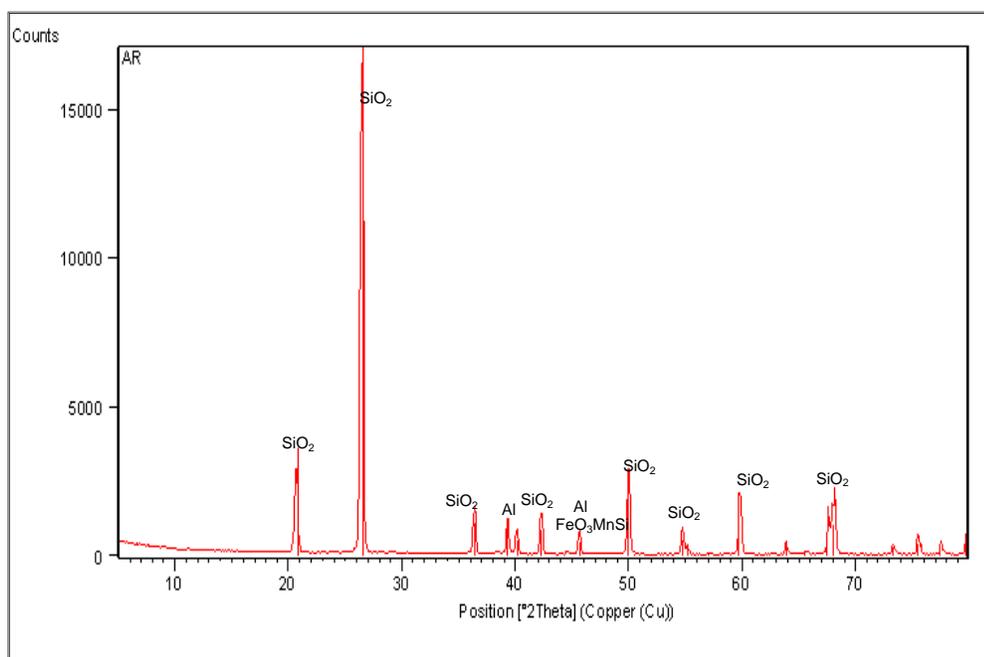


Figura 51. Difractograma de rayos X de la arena gastada retenido en la malla #200.

6.11 Morfología por microscopía electrónica de barrido del cemento Pórtland.

En la tabla 21, aparece la descripción morfológica del Cemento Pórtland Ordinario CPO 40, y en la figura 52 se puede observar una imagen típica de las partículas de cemento.

Tabla 21. Descripción morfológica del CPO obtenida en base a las observaciones en el microscopio electrónico de barrido.

Material	Morfología
CPO	Partículas de aristas angulosas.

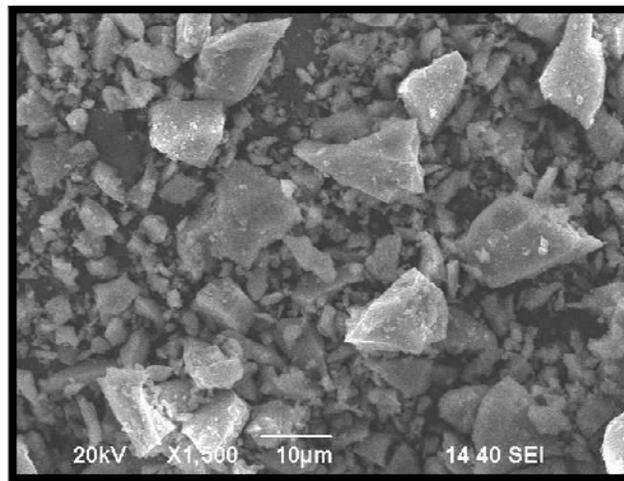


Figura 52. Partículas con aristas angulosas del CPO 40 Vistas en Microscopio electrónico de barrido.

6.12 Análisis granulométrico de las arenas gastadas.

En la **Figura 53**, se reporta la distribución de tamaño de partícula de la arena gastada mediante el uso de de mallas # 50, 100, 200 y 325.

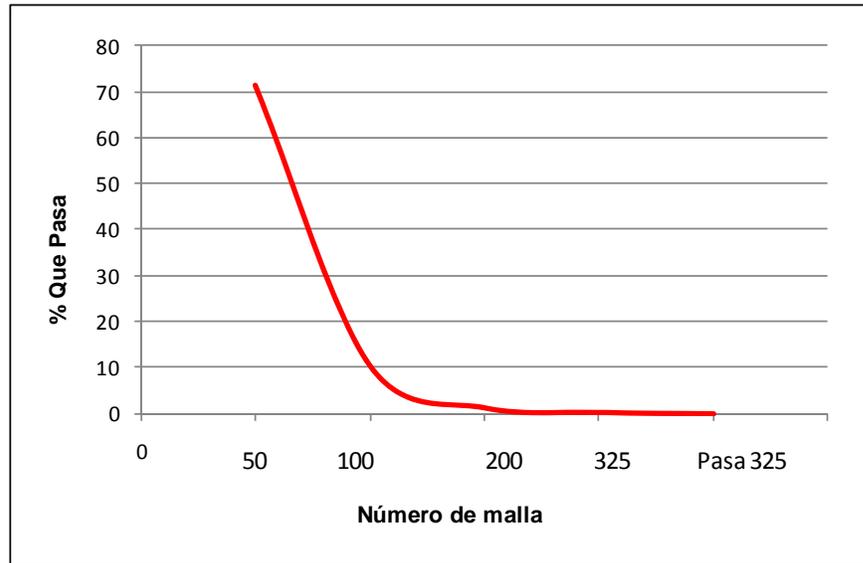


Figura 53. Distribución de tamaño de partícula para las muestras de arena gastada en greña.

En la tabla 22, se aprecian los valores de la distribución de tamaño de partículas de la arena gastada en greña de acuerdo a la norma ASTM C 33-05 [70].

Tabla 22. Distribución de tamaño de partícula de la arena gastada en greña.

Tamaño mm	Malla #	Retenido Parcial g	Retenido parcial %	Retenido acumulado %	% que pasa en
297	50	54.68	28.68	28.68	71.3
149	100	116.00	60.84	89.52	10.5
74	200	17.45	9.15	98.68	1.3
44	325	1.87	0.98	99.66	0.3
< 44	charola	0.65	0.34	100.00	0.0
	Σ	190.65	99.99		

Se encontró que el porcentaje mayor de retenido fué en las mallas # 50 y 100 (entre 297 y 149 μm), también se observó, que hubo partículas retenidas en la malla # 200 y la cantidad apreciable de aluminio retenido en cada nivel de malla es diferente entre la malla #100 y #200, en las arenas gastadas (**figura 54**).



a)



b)



c)

Figura 54. Aspecto de la distribución de granos de arena y aluminio. **a)** Arena en greña, **b)** Arena retenido malla # 100 y **c)** Arena retenido malla # 200.

6.13 Pérdida por ignición.

En la tabla 23, se muestran los resultados de L.O.I de los diferentes materiales estudiados. El mayor contenido de elementos orgánicos en las arenas gastadas en greña es debido a la acumulación de los mismos componentes orgánicos en las partículas más finas. Existe un mayor porcentaje de L.O.I en la arena gastada en greña con relación a las arenas gastadas retenidas en la malla #100 y malla #200, esto por un mayor contenido de aluminio y partículas orgánicas presentes en las arenas de greña.

Tabla 23. Resultados de la perdida por ignición.

L.O.I (Pérdida por Ignición)	
Material	% L.O.I
Cemento CPO 40	3.04
Arena gastada en greña	1.83
Arena retenida en la malla # 100	1.03
Arena retenida en la malla # 200	1.05

6.14 Contenido de aire de mortero, Método Volumétrico ASTM C 185-04 ⁽⁶⁵⁾.

En la tabla 24, se muestran los resultados del contenido de aire del mortero de referencia y de los morteros fabricados con 70 % de arena de sílice y 30 % de arena gastada en greña, similarmente para los morteros con arena gastada retenido en malla #100 y en malla #200. Tomando como base el mortero de referencia, en la tabla 25 podemos observar que él % de incremento entre la mezcla de referencia y la arena gastada en greña es de un 25%, para la mezcla con arena gastada retenida en malla #100 se determino un 12.5%, mientras que para la arena gastada retenida en malla #200 fué de 20%.

Tabla 24. Resultados del contenido de aire.

Material	Contenido de aire, %	% de incremento
Mezcla de referencia (100% arena de sílice)	4.0	0
Mezcla 70 % arena de sílice y 30 % de arena gastada en greña.	5.0	25
Mezcla 70 % arena de sílice y 30 % de arena gastada retenido malla # 100.	4.5	12.5
Mezcla 70 % arena de sílice y 30 % de arena gastada retenido malla # 200.	4.8	20

Los morteros que se fabricaron con material de greña tuvieron mayor contenido de aire debido a la alta proporción de partículas de aluminio y finos. El polvo de aluminio al reaccionar produce hidrogeno por lo que incluye aire en el concreto. Además, entre más fino sea el agregado, este tiende a atrapar más aire, ya que se requiere mayor cantidad de energía para retirar el aire atrapado. El mortero fabricado con arena de greña fué el que presentó mayor contenido de aire respecto a los morteros fabricados con arena gastada malla #100 y malla #200, (figura 55).



Figura 55. Medición del contenido de aire de los morteros.

6.15 Fluidez de los morteros.

En la tabla 25, se muestran los resultados de la fluidez de los morteros fabricados con arena gastada en greña, retenido en malla # 100 y malla # 200, así como el mortero de referencia.

Los resultados mostrados en la tabla 25, indican que la fluidez de los morteros fabricados con el 30 % de arena gastada es muy baja, respecto a un mortero de referencia. Debido al uso de la arena gastada, con un remplazo del 30% en arena gastada en greña, arena retenida en malla #100 y arena retenida en malla #200, mostraron una fluidez muy baja, esto debido a la morfología que presentaron las partículas de aluminio y a la absorción que presentan las arenas gastadas de fundición.

Tabla 25. Resultados de fluidez.

Material	Fluidez, %	%, de disminución de la fluidez
Mezcla de referencia (100% arena de sílice)	108	-
Mezcla 70 % arena de sílice y 30 % de arena gastada en greña.	68	40
Mezcla 70 % arena de sílice y 30 % de arena gastada retenido malla # 100.	66	39
Mezcla 70 % arena de sílice y 30 % de arena gastada retenido malla # 200.	65	39

6.16 Tiempo de fraguado.

Se fabricaron tres distintas mezclas para evaluar los tiempos de fraguado inicial y final en cada mortero fabricado, se fabricó una mezcla utilizando el 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice, otra con 30% de arena gastada retenido malla #100 y 70% arena de sílice y finalmente 30% de arena gastada retenido malla #200 y 70% de arena de sílice, cabe señalar que estas tres mezclas fueron comparadas con una mezcla de referencia utilizando el 100% de arena de sílice con una relación de a/c de 0.5.

En la tabla 26 se muestran los resultados del mortero de referencia fabricado con 100% de arena de sílice. En la tabla 27, podemos observar los resultados del mortero fabricado con 30% arena gastada en greña y 70% de arena de sílice. En la tabla 28, se muestran los resultados del mortero fabricado con 30% arena gastada retenida en malla #100 y 70% de arena de sílice y en la tabla 29, podemos observar los resultados del mortero fabricado con 30% arena gastada retenida en malla #200 y 70% de arena de sílice. Los resultados de los morteros fabricados con arena gastada, indicaron que el tiempo de fraguado comparado con en el mortero de referencia fué de por lo menos de tres horas.

Los resultados del tiempo de fraguado para los tres morteros fabricados con arena gastada, indicaron un tiempo de fraguado inicial de tres horas y un fraguado final de cinco horas. En relación y comparado con el mortero de referencia se pudo observar que la diferencia entre el fraguado inicial de los morteros con arenas gastadas fué de 2 horas y tres horas respecto al fraguado final. Durante esta prueba se observó la expansión en los morteros fabricados que contenía arena gastada, como consecuencia a esta reacción provocó una resistencia mecánica a compresión menor y un tiempo de fraguado mayor.

Tabla 26. Resultados del tiempo de fraguado con arena de sílice (referencia).

Tiempo de fraguado de morteros mediante la prueba de resistencia a la penetración ASTM C 403-06

Fraguado Inicial (F.I) = 500 psi
 Fraguado Final (F.F) = 4000 psi

Hora de contacto (agua con el cemento)	Duración de prueba:
13:01:00	3:29:00

Nomenclatura	REF
0 - 89	
89 - 99	
100 - 200	

Carga (LbsF)	Hora de penetración	Aguja	Tiempo Trans. (min)	Tiempo Acum. (min)	Area de presión de la aguja (in ²)
84	13:48:00	1	47	47	1
84	13:48:00	1	0	47	1
84	13:48:00	1	0	47	1
93	14:35:00	2	47	94	0.5
93	14:35:00	2	0	94	0.5
93	14:35:00	2	0	94	0.5
100	15:00:00	3	25	119	0.25
100	15:00:00	3	0	119	0.25
100	15:00:00	3	0	119	0.25
92	15:35:00	4	35	154	0.1
92	15:35:00	4	0	154	0.1
92	15:35:00	4	0	154	0.1
78	15:55:00	5	20	174	0.05
78	15:55:00	5	0	174	0.05
78	15:55:00	5	0	174	0.05
82	16:30:00	6	35	209	0.025
82	16:30:00	6	0	209	0.025
82	16:30:00	6	0	209	0.025

RESISTENCIA A LA PENETRACION (PR) PSI
84
84
84
186
186
186
400
400
400
920
920
920
1560
1560
1560
3280
3280
3280

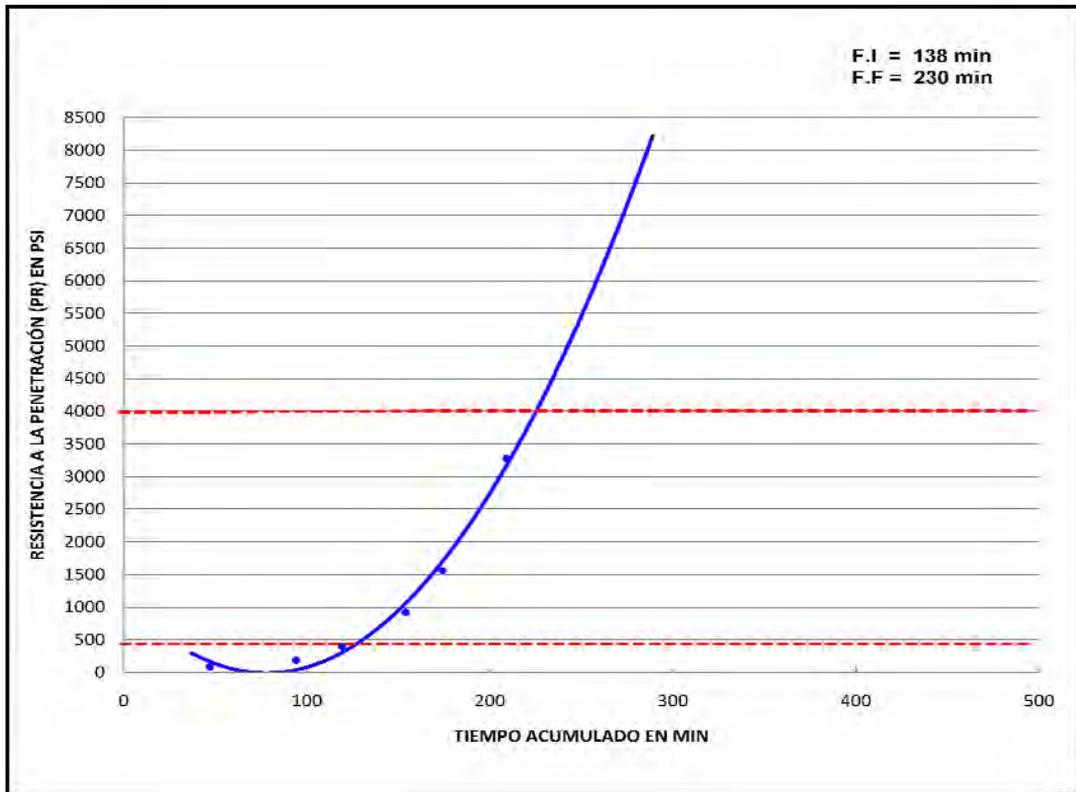


Figura 56. Gráfica del tiempo del fraguado de mortero de referencia.

Tabla 27. Resultados del tiempo de fraguado con arena gastada en greña.

Tiempo de fraguado de morteros utilizando 30% arena de greña y 70% arena de sílice, mediante la prueba de resistencia a la penetración ASTM C 403-06

Fraguado Inicial (F.I) = 500 psi
 Fraguado Final (F.F) = 4000 psi

Hora de contacto (agua con el cemento)	15:05:00	Duración de prueba:	4:55:00
---	----------	----------------------------	---------

Nomenclatura 0 - 89 89 - 99 100 - 200	G
--	----------

Carga (LbsF)	Hora de penetracion	Aguja	Tiempo Trans. (min)	Tiempo Acum. (min)	Area de presion de la aguja (in ²)
64	16:25:00	1	80	80	1
64	16:25:00	1	0	80	1
98	16:50:00	1	25	105	1
118	17:25:00	2	35	140	0.5
118	17:25:00	2	0	140	0.5
118	17:25:00	2	0	140	0.5
195	18:10:00	3	45	185	0.25
195	18:10:00	3	0	185	0.25
195	18:10:00	3	0	185	0.25
90	18:20:00	4	10	195	0.1
90	18:20:00	4	0	195	0.1
90	18:20:00	4	0	195	0.1
92	18:45:00	5	25	220	0.05
92	18:45:00	5	0	220	0.05
92	18:45:00	5	0	220	0.05
90	20:00:00	6	75	295	0.025
90	20:00:00	6	0	295	0.025
90	20:00:00	6	0	295	0.025

RESISTENCIA A LA PENETRACION (PR) PSI
64
64
98
236
236
236
780
780
780
900
900
900
1840
1840
1840
3600
3600
3600

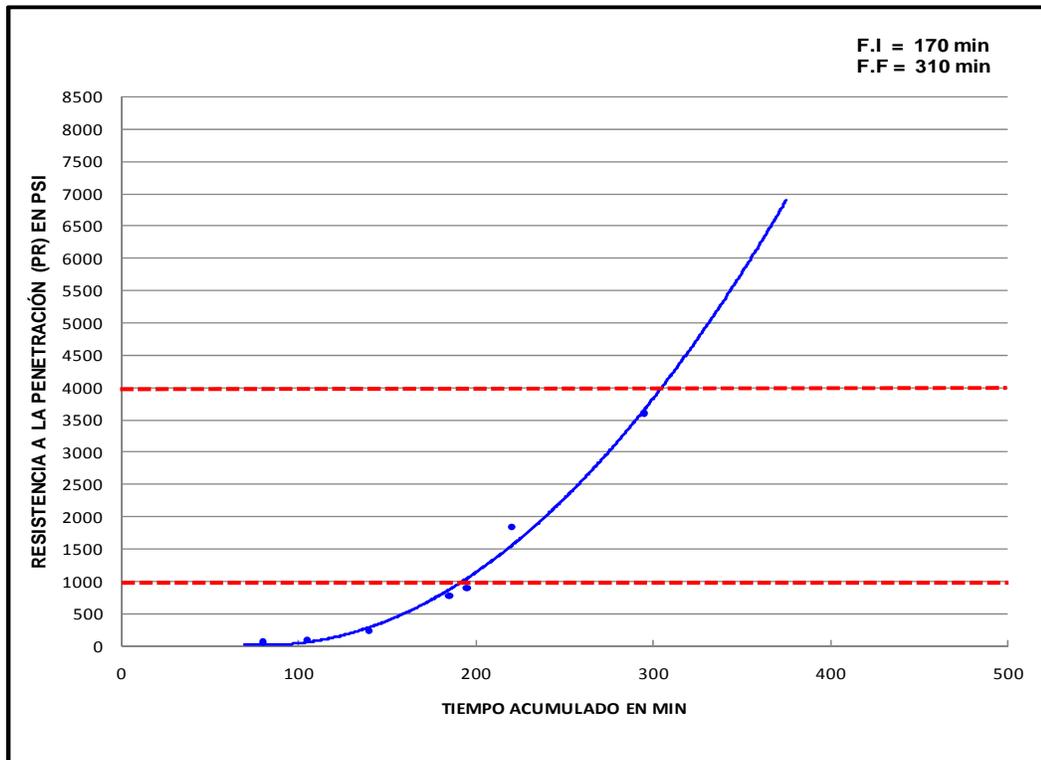


Figura 57. Gráfica del tiempo de fraguado del mortero con arena gastada de greña.

Tabla 28. Resultados del tiempo de fraguado con arena gastada retenido en malla #100.

Tiempo de fraguado de morteros utilizando 30% de arena gastada retenido en la malla #100 y 70% arena de silice mediante la prueba de resistencia a la penetración ASTM C 403-06													
Fraguado Inicial (F.I) = 500 psi													
Fraguado Final (F.F) = 4000 psi													
Hora de contacto (agua con el cemento)		14:00:00		Duracion de prueba: 4:40:00									
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 50%;">Nomenclatura</th> <th style="width: 50%; text-align: center; font-size: 2em;">RT 100</th> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">● 0 - 89</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">● 89 - 99</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">● 100 - 200</td> <td></td> </tr> </table>						Nomenclatura	RT 100	● 0 - 89		● 89 - 99		● 100 - 200	
Nomenclatura	RT 100												
● 0 - 89													
● 89 - 99													
● 100 - 200													
RESISTENCIA A LA PENETRACION (PR) PSI													
85													
85													
85													
200													
200													
200													
480													
480													
480													
980													
980													
980													
1800													
1800													
1800													
3400													
3400													
3400													

Carga (LbsF)	Hora de penetracion	Aguja	Tiempo Trans. (min)	Tiempo Acum. (min)	Area de presion de la aguja (in ²)
85	15:40:00	1	100	100	1
85	15:40:00	1	0	100	1
85	15:40:00	1	0	100	1
100	16:10:00	2	30	130	0.5
100	16:10:00	2	0	130	0.5
100	16:10:00	2	0	130	0.5
120	16:40:00	3	30	160	0.25
120	16:40:00	3	0	160	0.25
120	16:40:00	3	0	160	0.25
98	17:00:00	4	20	180	0.1
98	17:00:00	4	0	180	0.1
98	17:00:00	4	0	180	0.1
90	17:30:00	5	30	210	0.05
90	17:30:00	5	0	210	0.05
90	17:30:00	5	0	210	0.05
85	18:40:00	6	70	280	0.025
85	18:40:00	6	0	280	0.025
85	18:40:00	6	0	280	0.025

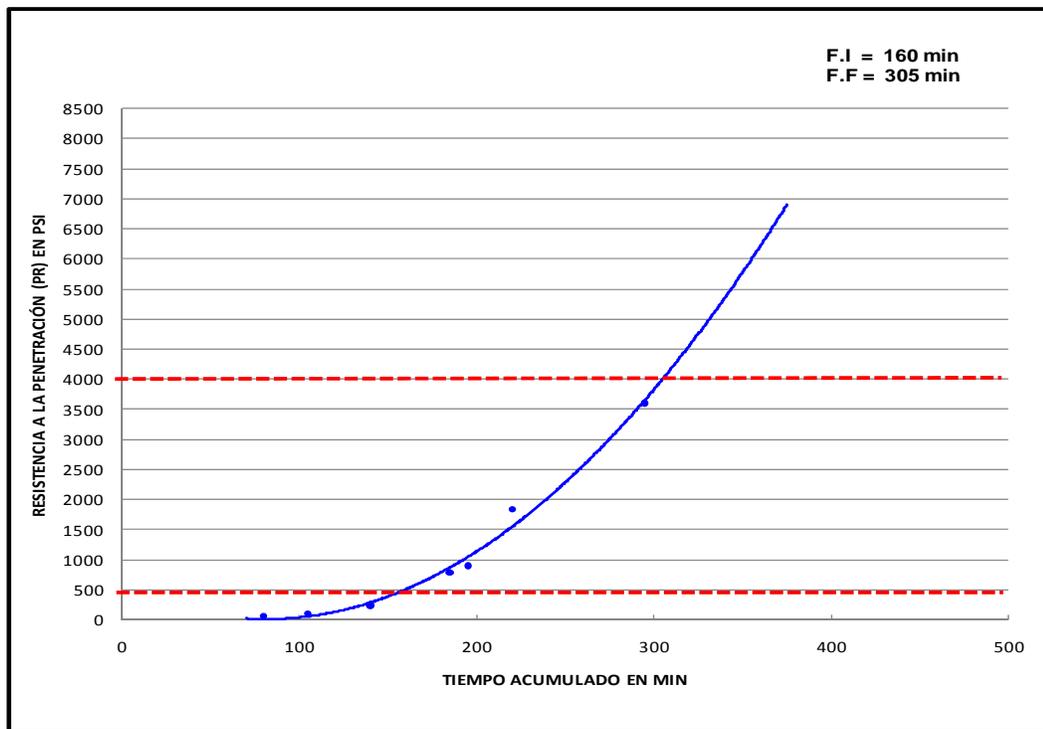


Figura 58. Gráfica del tiempo de fraguado del mortero con arena gastada retenido en malla #100.

Tabla 29. Resultados del tiempo de fraguado con arena gastada retenido en malla #200.

Tiempo de fraguado de morteros utilizando 30% de arena gastada retenido en la malla #200 y 70% arena de silice mediante la prueba de resistencia a la penetración ASTM C 403-06

Fraguado Inicial (F.I) = 500 psi
 Fraguado Final (F.F) = 4000 psi

Hora de contacto (agua con el cemento)	16:00:00	Duración de prueba:	4:45:00
---	----------	----------------------------	---------

Nomenclatura 0 - 89 89 - 99 100 - 200	RT 200
--	---------------

Carga (LbsF)	Hora de penetración	Aguja	Tiempo Trans. (min)	Tiempo Acum. (min)	Area de presion de la aguja (in ²)
105	18:00:00	1	120	120	1
105	18:00:00	1	0	120	1
105	18:00:00	1	0	120	1
125	18:30:00	2	30	150	0.5
125	18:30:00	2	0	150	0.5
125	18:30:00	2	0	150	0.5
182	19:00:00	3	30	180	0.25
182	19:00:00	3	0	180	0.25
182	19:00:00	3	0	180	0.25
98	19:00:00	4	0	180	0.1
98	19:00:00	4	0	180	0.1
98	19:00:00	4	0	180	0.1
100	19:35:00	5	35	215	0.05
100	19:35:00	5	0	215	0.05
100	19:35:00	5	0	215	0.05
80	20:35:00	6	60	275	0.025
120	20:45:00	6	10	285	0.025
120	20:45:00	6	0	285	0.025

RESISTENCIA A LA PENETRACION (PR) PSI
105
105
105
250
250
250
728
728
728
980
980
980
2000
2000
2000
3200
4800
4800

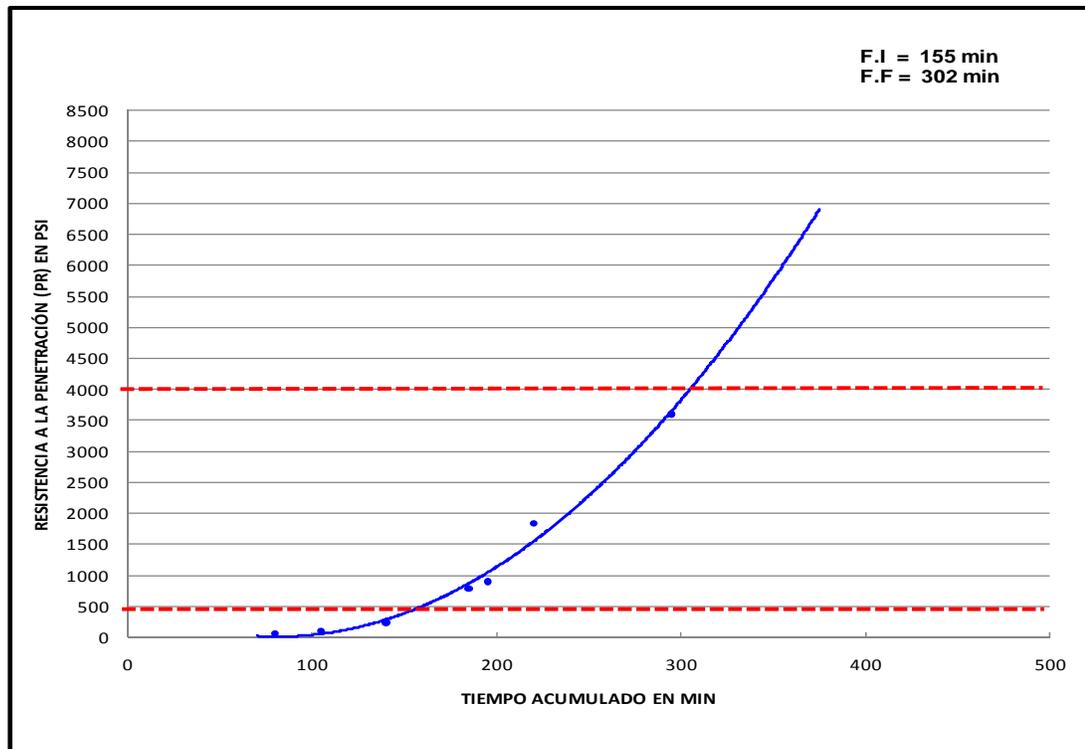


Figura 59. Gráfica del tiempo de fraguado del mortero con arena gastada retenido en malla #200.

6.17 Resultados de pruebas exploratorias para el diseño de mortero de prueba.

En la tabla 30, se muestran los resultados obtenidos en las mezclas del mortero de prueba utilizando Cemento Pórtland compuesto (CPC 30) y un Cemento Pórtland Ordinario 40 (CPO 40). Los proporcionamientos utilizados para estas mezclas fueron, el definido por la norma ASTM C 109-04^[64] y un proporcionamiento que se denominó “M³” y derivado de la norma ASTM C 109-04, este proporcionamiento fué diseñado con el objetivo de consumir mayor arena gastada y un menor consumo de cementante, aumentando el consumo de A/C para que fuera trabajable el mortero. Con una relación de A/C de 0.48 conforme a la norma ASTM, el mortero fabricado era viscoso y como consecuencia no era trabajable. En el principio de las pruebas exploratorias se fabricaron mezclas con un cemento CPC 30, los resultados esperados a la resistencia mecánica no eran los favorables, por tal motivo se determino trabajar con un cemento CPO 40 y la resistencia mecánica de los morteros era la esperada de acuerdo algunas investigaciones realizadas al sustituir el 30 % de arena gastada. Estas pruebas se realizaron para encontrar el mejor comportamiento en cada mortero fabricado, variando la relación A/C, el tipo de cemento y los diferentes porcentajes de arena gastada. Se encontró que el mejor comportamiento se presentó utilizando 30 % de arena gastada y 70% de arena de sílice, con una relación de A/C de 0.5. Cabe señalar que en esta tabla aparece una mezcla fabricada con una relación de A/C de 0.6, utilizando solamente el 30% de finos de arena gastada y 70% de arena de sílice con un cemento CPO. Esta prueba se utilizó para observar el efecto de las adiciones minerales del CPO con las arenas gastadas, el efecto encontrado fué que se encontraron buenos resultados utilizando puros finos con esta relación, sin embargo para esta investigación se decidió estudiar la arena gastada sin que tuviera algún acondicionamiento.

Tabla 30. Resultados de las pruebas exploratorias para la fabricación de los morteros de prueba.

	A/C	consumo de cemento	Cemento	% Arena Estándar	% Arena de Desgaste	Norma de la prueba	Resistencia a la Compresión					Area (mm ²)	Comentarios
							1 día MPa	3 días Mpa	7 días Mpa	14 días Mpa	28 días Mpa		
Prueba 1	0.48	325	CPC	100	0	ASTM 109	12	18	24	26	30	2500	Esta prueba se realizó con el 100% de arena de sílice Ottawa
Prueba 2	0.48	325	CPC	60	40	ASTM 109	2	4	8	11	15	2500	Esta prueba se realizó con arena gastada sin ningún tipo de acondicionamiento (en greña).
Prueba 3	0.48	325	CPC	70	30	ASTM 109	6	9	13	16	20	2500	Esta prueba se realizó con arena gastada sin ningún tipo de acondicionamiento (en greña).
Prueba 4	0.5	325	CPC	100	0	M ³	12	17	23	25	29	2500	Esta prueba se realizó con el 100% de arena de sílice Ottawa
Prueba 5	0.5	325	CPC	70	30	M ³	9	12	14	16	19	2500	Esta prueba se realizó con arena gastada sin ningún tipo de acondicionamiento (en greña).
Prueba 6	0.5	325	CPC	70	30	M ³	8	11	13	15	18	2500	Esta prueba se realizó con arena gastada retenida en la malla # 200.
Prueba 7	0.5	325	CPO	100	0	M ³	16.0	21.0	25.0	29	38	2500	Esta prueba se realizó con 100% de arena de sílice Ottawa
Prueba 8	0.5	325	CPO	60	40	M ³	4.0	5.0	9.0	13	16	2500	Esta prueba se realizó con arena gastada sin ningún tipo de acondicionamiento (en greña).
Prueba 9	0.6	325	CPO	70	30	M ³	15.0	18.0	23.0	27	34	2500	Esta prueba se realizó con finos de arena gastada.
Prueba 10	0.5	325	CPO	70	30	M ³	12.0	15.0	20.0	23	28	2500	Esta prueba se realizó con arena gastada sin ningun tipo de acondicionamiento (en greña).
Prueba 11	0.5	325	CPO	70	30	M ³	10.0	13.0	18.0	20	24	2500	Esta prueba se realizó con arena gastada retenida en la malla # 100.
Prueba 12	0.5	325	CPO	70	30	M ³	11.0	14.0	19.0	22	27	2500	Esta prueba se realizó con arena gastada retenida en la malla # 200.

6.18 Resultados de la resistencia a compresión del mortero experimental definitivo.

En la **tabla 31**, se muestran los resultados de la resistencia mecánica a la compresión del mortero experimental definitivo a diferentes edades.

Los resultados mostrados en la **figura 60**, indican que el mortero con mejor comportamiento fué el fabricado con arena gastada en greña comparado con el mortero de referencia y corresponde a la mezcla 2, utilizando el proporcionamiento M^3 , con una relación A/C de 0.5. La resistencia a la compresión a las 28 días de curado fué de 30 MPa, en comparación a la mezcla de referencia en las mismas condiciones, se presenta una disminución de 14%, cuando la arena es tamizada se muestra una mayor disminución de resistencia, del orden del 23%. El enfoque de utilización de las mezclas con arena gastada es que normalmente se considera que deben tener una resistencia similar a la de referencia o incluso mayor en el uso en concretos de elevada resistencia. Esta situación se ha experimentado cuando los reemplazos en agregado fino son menores al 15% pero, un enfoque de baja resistencia a la compresión puede ser utilizado como un posible beneficio cuando materiales agregados subproductos son utilizados y el uso en reemplazo es superior al 15% como lo es para fabricar materiales de baja resistencia controlada, tal y como se ha realizado en otros trabajos soportando el enfoque de desarrollo sustentable con la integración de materiales subproductos en mezclas de morteros. La definición de materiales de baja resistencia controlada son aquellos que se utilizan para rellenos planos, control de erosión, rellenos de minas, etc y los cuales no necesitan compactación ni necesitan resistencias elevadas en caso de realizar alguna excavación posterior según el ACI Committee 229R, 1999 ^[76].

Tabla 31. Resultados de la resistencia a compresión de los morteros definitivos.

Días	<ul style="list-style-type: none"> A/C 0.5 100% Arena de sílice. CPO 40 M³ 	<ul style="list-style-type: none"> A/C 0.5 70% Arena de sílice 30% Arena gastada en greña. CPO 40 M³ 	<ul style="list-style-type: none"> A/C 0.5 70% Arena de sílice 30% Arena gastada retenido en malla # 100 CPO 40 M³ 	<ul style="list-style-type: none"> A/C 0.5 70% Arena de sílice 30% Arena gastada retenido en malla # 200 CPO 40 M³
	MPa	MPa	MPa	MPa
1	17	13	11	12
3	24	17	14	15
7	29	22	18	20
14	32	26	23	25
28	38	30	26	29
	MEZCLA 1	MEZCLA 2	MEZCLA 3	MEZCLA 4

En la **Figura 60**, se muestra los resultados a compresión de los morteros fabricados de acuerdo a los valores obtenidos en la **tabla 31**.

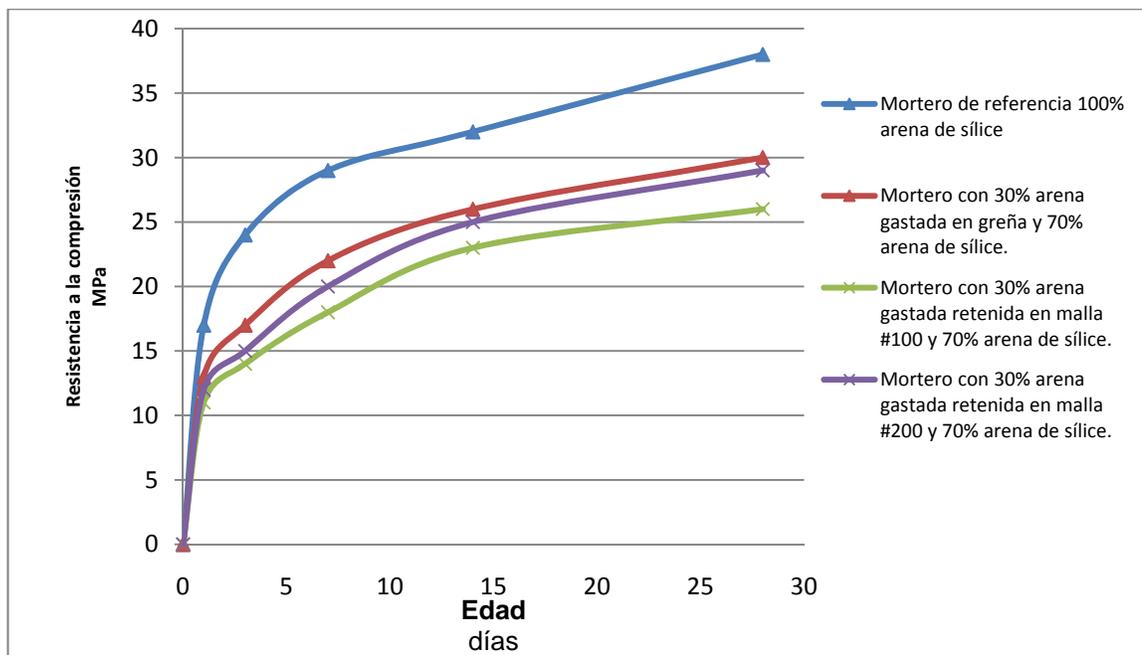


Figura 60. Gráfica de los resultados de la resistencia a compresión del mortero definitivo.

En este trabajo el efecto del mayor contenido de partículas finas, oscureció la presencia de elementos contaminantes en las arenas gastadas cuando se realizaron pruebas a compresión ^[77, 78]. El uso de agregados reciclados afecta la resistencia a la compresión de los morteros en función de su tamaño, agregado grueso o agregado fino y la composición química de los mismos aunque en la mayoría de los trabajos solo se estima la resistencia que desarrolla con el reemplazo de agregados, no se relaciona directamente como el modo de falla de los mismos ^[79].

En algunos estudios donde se ha realizado el reemplazo del agregado fino se reporta que se puede tener resistencia a la compresión de similar desempeño, aproximadamente de 3 a 25% menos, cuando se utiliza un reemplazo del 30% de agregado fino y/o grueso. Estos resultados deben ser interpretados en función de la composición química de los agregados de reemplazo debido a que la mayoría de los trabajos son con arenas gastadas de la industria de la fundición ferrosa y/o agregado triturado ^[80, 81].

6.19 Resultado del análisis térmico semi-adiabático del mortero fabricado con arena gastada.

Los resultados de esta prueba se observan en la figura 61, para lo cual se fabricaron tres diferentes mezclas con arena gastada, una utilizando 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice, otra con 30% de arena gastada retenido en malla #100 y 70% de arena de sílice y finalmente el 30% de arena gastada retenido en malla #200 y 70% de arena de sílice. Estas mezclas se fabricaron para comparar el análisis térmico de cada una de ellas durante un tiempo aproximado de 48 horas, el muestreo se tomó a cada 5 segundos. También se fabricó una mezcla de referencia como base para comparar los resultados de las mezclas que contenían arena gastada. La mezcla de referencia se fabricó utilizando 100% de arena de sílice, la relación utilizada fue de A/C 0.5.

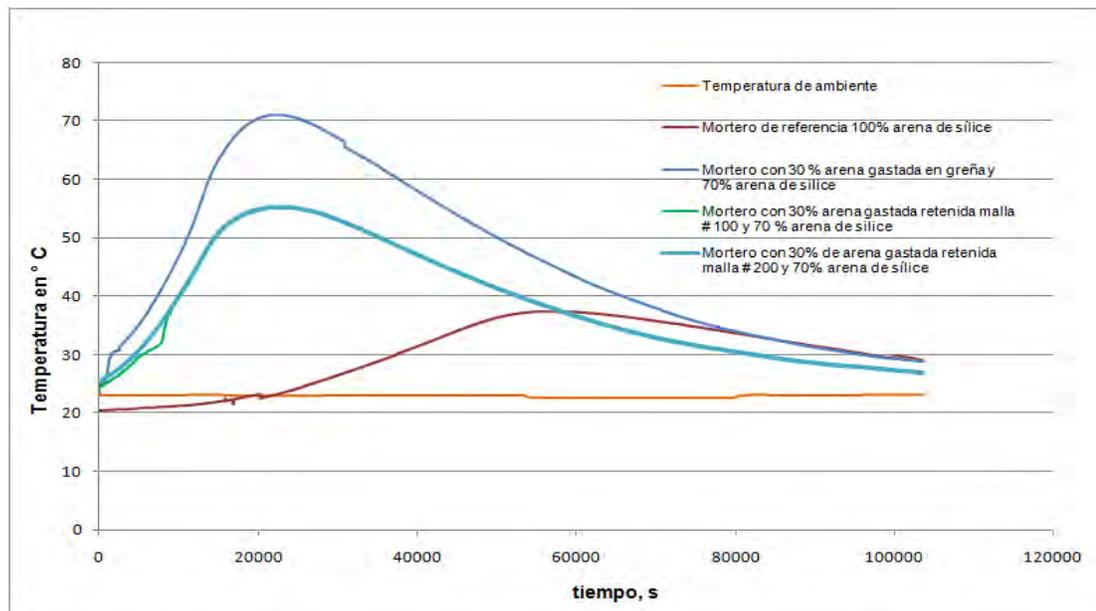


Figura 61. Resultados del calor de hidratación de los diferentes tipos de morteros fabricados con arena gastada.

La evaluación semi-adabiática es un método no estándar que ha sido utilizado por algunos investigadores como una herramienta para relacionar la temperatura debido a la reacción de hidratación. Este calor de hidratación se relaciona con el agrietamiento por contracción y la expansión de morteros con incluso de aire. El pico máximo de temperatura para la mezclas con arena gastada ocurrió alrededor de las 7 horas para las tres muestras de prueba pero, la máxima temperatura es 25% mayor para la arena en greña por lo que la velocidad de incremento de temperatura es mayor cuando el contenido de aluminio es mayor.

6.20 Expansión del mortero fabricado con arena gastada.

Los resultados obtenidos en la prueba de expansión se presentan en **la figura 62**. Estos morteros fueron fabricados con una relación A/C de 0.5. Los resultados mostraron que el mortero de referencia, tuvo un menor porcentaje de expansión respecto a los morteros fabricados con arena gastada en greña, arena gastada retenida en malla # 100 y malla # 200. El análisis de expansión que muestra la figura 62, indicó que el mortero de referencia tuvo un pequeño

porcentaje de contracción de 1%. El mortero fabricado con arena de greña tuvo un porcentaje de expansión. Los morteros fabricados con arena retenida en malla #100 y malla #200 fueron en menor proporción respecto a al fabricado con arena de greña. El análisis de esta prueba fué durante un tiempo aproximado de **48 horas**, el muestreo se tomó a cada **30 segundos**.

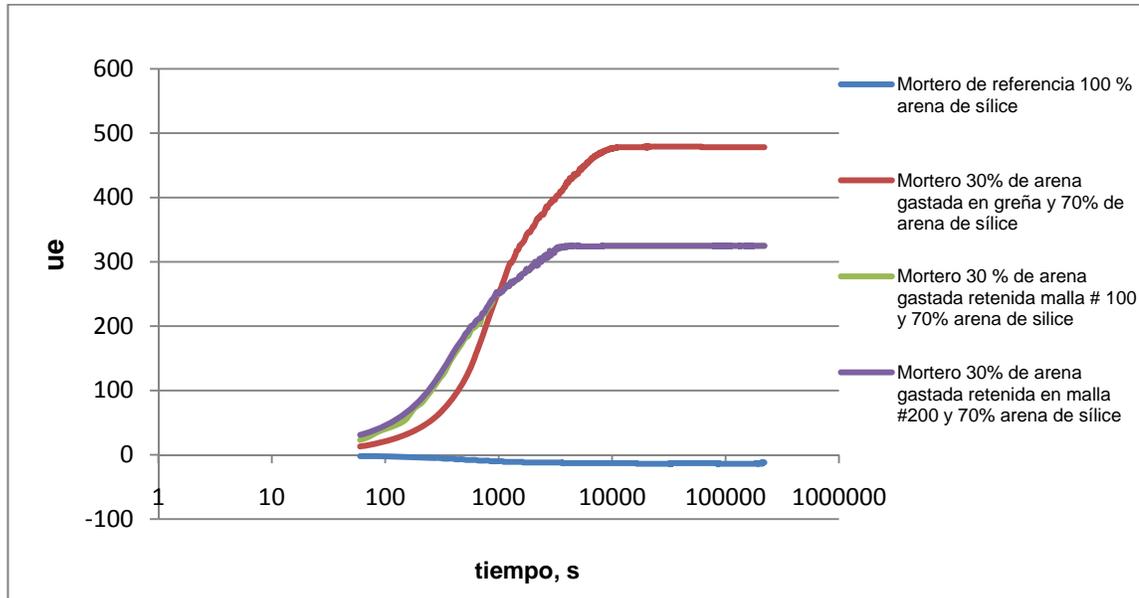


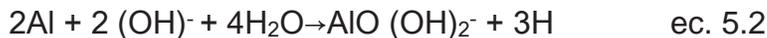
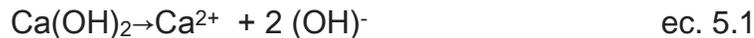
Figura 62. Resultados del análisis de expansión de los diferentes tipos de morteros fabricados con arena gastada.

Las aplicaciones donde la contracción de las mezclas es limitada o nula es un área de oportunidad para los fabricantes de morteros y concretos pero se debe encontrar una relación entre la expansión, la porosidad y la resistencia del material ^[82].

La expansión de los morteros es atribuída a la reacción del aluminio de la arena gastada con el hidróxido liberado durante la reacción de hidratación, ver 5.1 y 5.2 y esta se da durante las primeras 4 horas después del colocado del mortero por lo que se entiende que el gas liberado durante la reacción de hidratación promueve esta expansión y no al efecto de una reacción retardada entre los componentes de la mezcla. Cuando la arena gastada en greña no ha sido tratada o cribada, la expansión es 60% superior que cuando ha sido tamizada

en la malla #200. La expansión ocurre en la zona que corresponde a la mayor razón de incremento de temperatura en el análisis semi-adiabático de los morteros. Los cementos hidráulicos expansivos son aquellos cementos que en su composición química contienen elementos que promueven la expansión a edades tempranas de acuerdo a ASTM C 845. La adición de arena gastada a un CPO hace que este se comporte como un cemento hidráulico expansivo, debido a que la mayor expansión la tenemos a edades tempranas.

Los macroporos están asociados a la reacción del residuo de aluminio durante la hidratación del cemento de acuerdo a las siguientes reacciones:



Esta reacción clarifica la porosidad que van a desarrollar los morteros donde se presenten residuos de aluminio ^[85].

6.21 Microscopía electrónica de barrido (SEM) de los morteros experimentales definitivos.

En las **figuras 63** a la **65**, aparecen las microfotografías de las arenas gastadas. Se aprecian granos individuales así como granos aglomerados, debido a los residuos de las resinas de fundición. En la **figura 63.1** mediante el análisis químico de la figura 61, se pudo observar y comprobar el contenido de aluminio, fierro y elementos químicos adheridos a la muestra analizada.

Las **figuras 66** a la **68** corresponden a morteros fabricados con arena gastada en greña, arena gastada retenido en malla #100, arena gastada retenido en malla #200 y un mortero de referencia, respectivamente. Las imágenes fueron obtenidas vía microscopía electrónica de barrido (SEM). En la **figura 66**, se

observa la superficie de la muestra de referencia fabricada con 100% de arena de sílice, se puede identificar en la **figura 66.1** que la microestructura está caracterizada por la formación de CSH con un aspecto denso y compacto a edades de 7 días de curado. En las **figuras 67 y 67.1**, se puede observar y comprobar que la densidad de la pasta fué homogénea, y se observan poros cerca de partículas de aluminio embebidas en la matriz cementante y el desprendimiento de partículas de arena de sílice. Los defectos asociados al uso de agregados reciclados tiene relación con el método de mezclado utilizado, y existen alternativas con un enfoque de mezclado en dos etapas que pueden hacer disminuir la segregación de los mismos ^[83, 84].

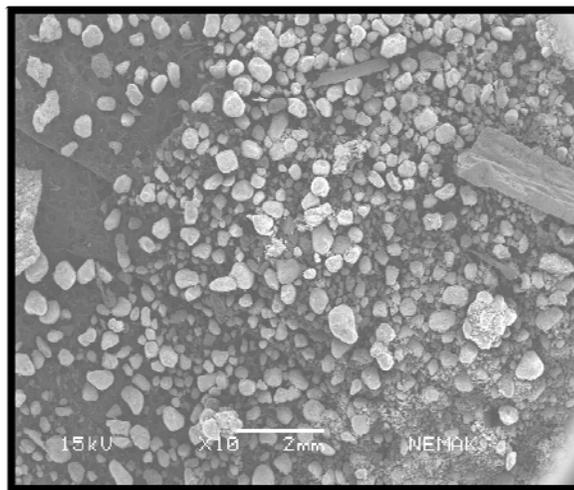


Figura 63. Micrografía de la arena gastada en greña, 10X 2mm.

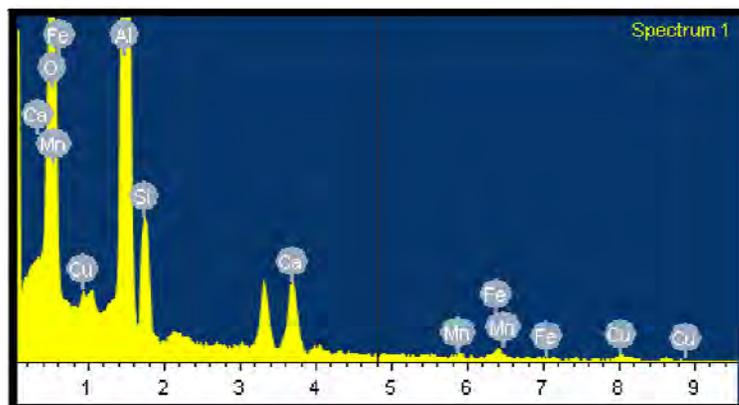


Figura 63.1. Análisis químico de la muestra de la figura 63.

En la figura 64 y 65, se observa pequeñas partículas en la unión de arena de sílice y resina.

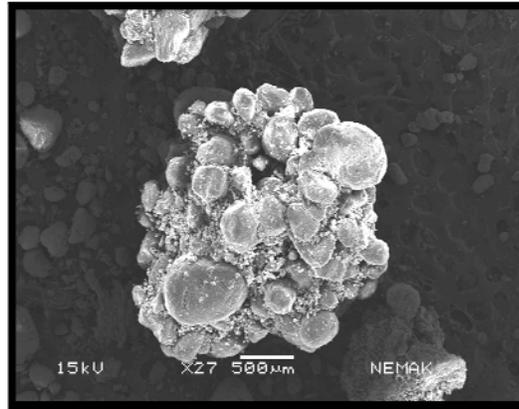


Figura 64. Micrografía de la arena retenida en malla #100, 2X7 500µm.

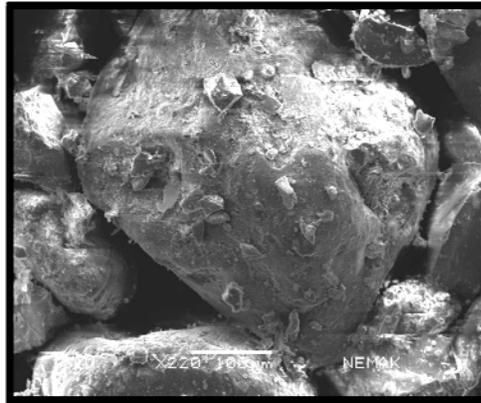


Figura 65. Micrografía de la arena gastada retenida en malla #200, 220X 100µm.

En la **figura 68**, correspondiente al mortero fabricado con 70 % arena de sílice y 30% de arena gastada en greña con 3 días de curado, se observa granos de arena de sílice así como partículas de aluminio lo cual se demuestra en el espectro EDX que se presenta en la **figura 68.1**. Estas partículas de aluminio en una mezcla de mortero tienden a reaccionar con el cemento, dando como resultado baja resistencia a la compresión y un alto contenido de calor de hidratación en la mezcla. Los estudios microestructurales son una importante herramienta para determinar los factores que promueven la formación de características que disminuirán la resistencia mecánica de los materiales. La

importancia está en identificar la formación de poros y las causas relativas a su origen debido a la naturaleza contaminada de los agregados.

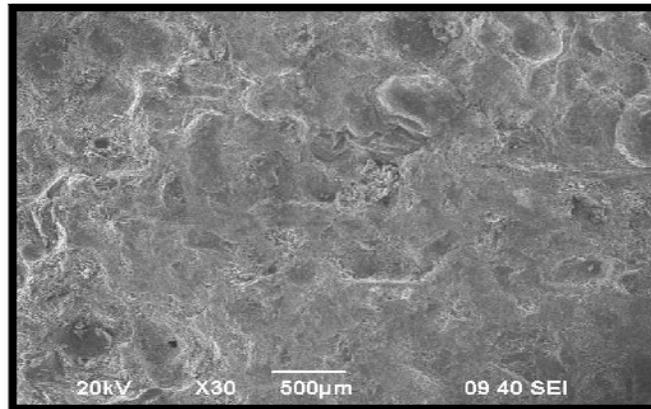


Figura 66. Micrografía de muestra con 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice "7 días de curado". **30X 500µm.**

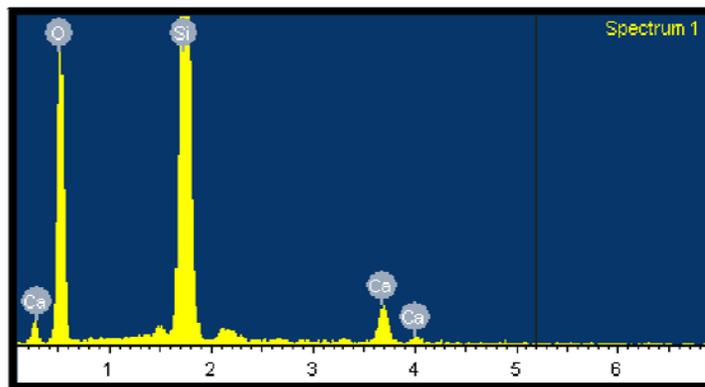


Figura 66.1. Análisis químico obtenido de la figura 66.

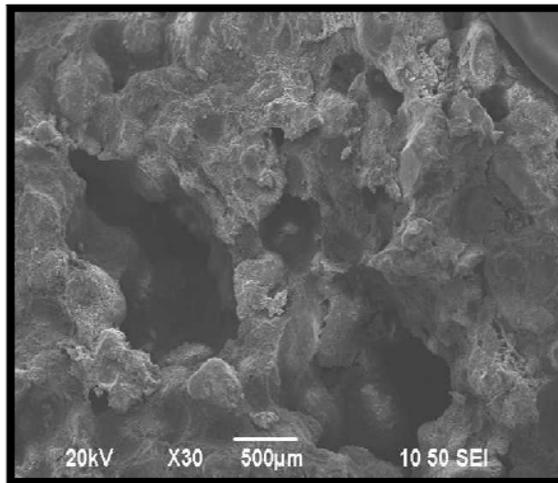


Figura 67. Micrografía de muestra con 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice “1 día de curado”. **30X 500µm.**

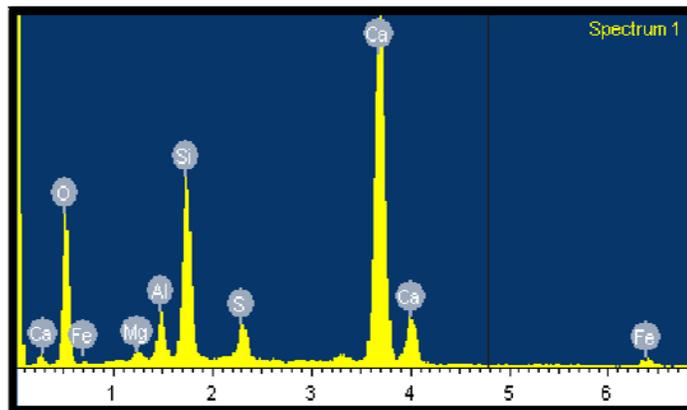


Figura 67.1. Análisis químico obtenido de la figura 67.

En la **figura 68**, se observa una aglomeración de partículas de sílice y aluminio.

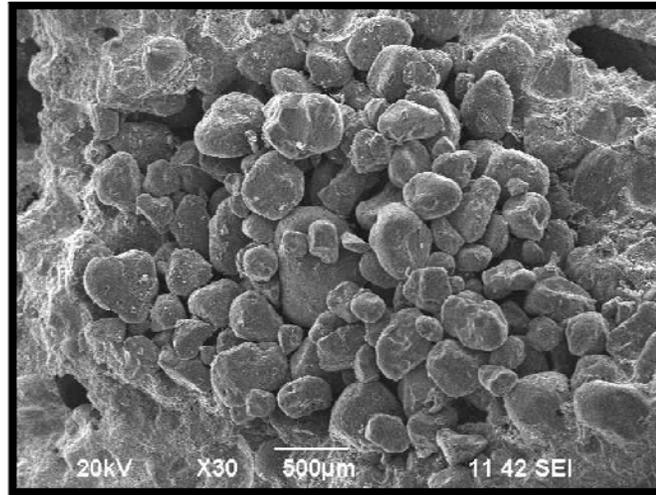


Figura 68. Micrografía de muestra con 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice "3 días de curado" 30X 500µm.

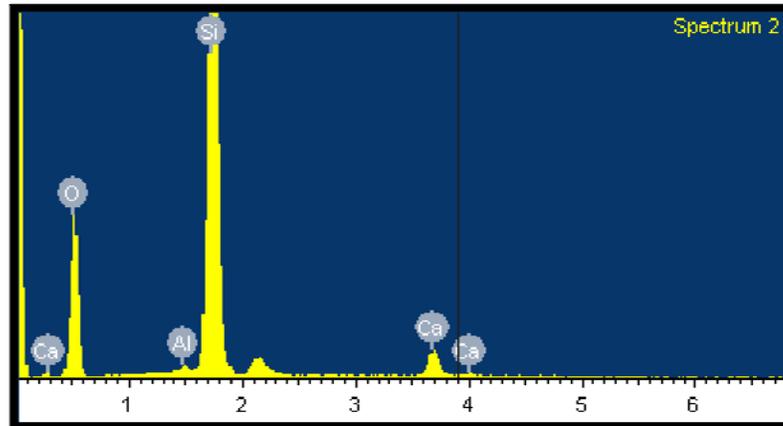


Figura 68.1. Análisis químico obtenido de la figura 68.

En la **figura 69**, se observa una gran cantidad de partículas de aluminio (**ver figura 69.1**) embebidas en el mortero, así como también partículas de arena de sílice desprendidas por la pasta homogénea. La identificación puntual de las partículas de aluminio a partir de las microestructurales se asocia a la porosidad encontrada en los morteros, la forma y la distribución de los mismos.

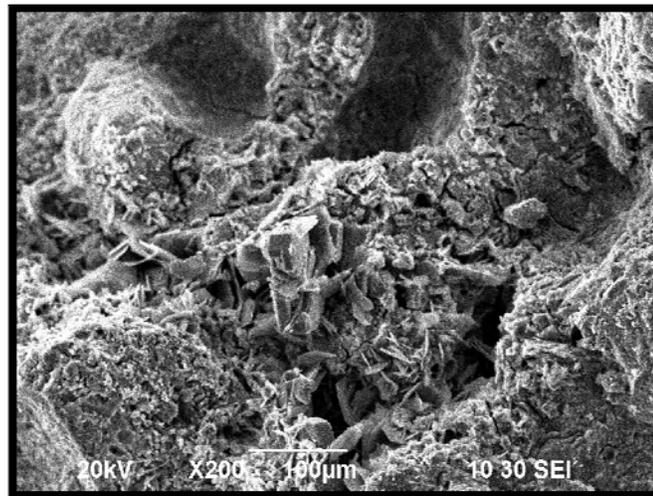


Figura 69. Micrografía de muestra con 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice “7 días de curado” **200X 100µm.**

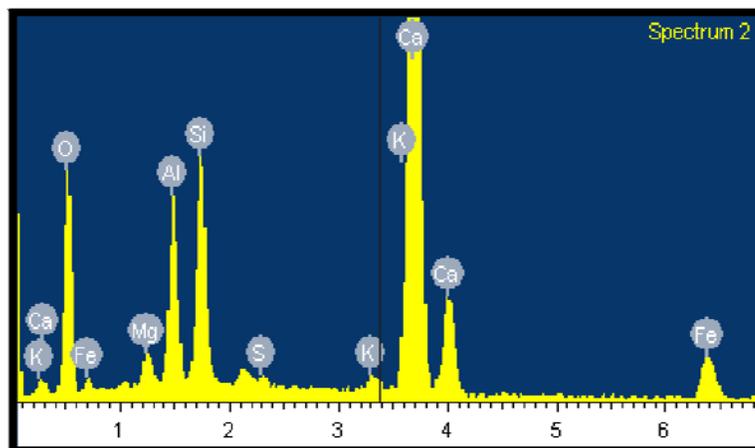


Figura 69.1 Análisis químico obtenido de la figura 69.

En la **figura 70**, se muestra una microestructura caracterizada por la reacción del CSH y partículas de aluminio distribuidas entre sí. El análisis químico que muestra la figura 68.1, indica que la muestra de la figura 68 contiene elementos como el aluminio, sílice y en menor proporción picos de hierro.

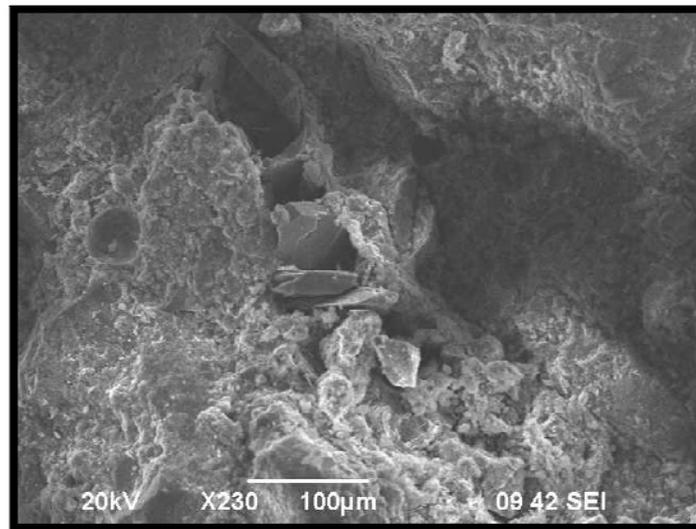


Figura 70. Micrografía de muestra con 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice “14 días de curado” 230X 100µm.

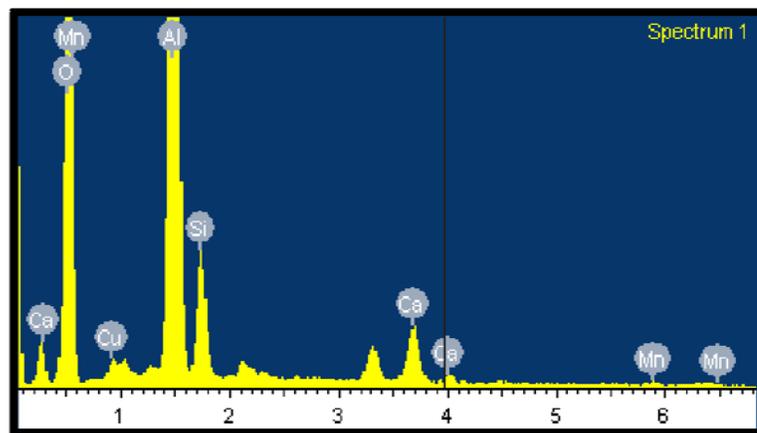


Figura 70.1. Análisis químico obtenido de la figura 70.

En la **figura 71**, se observa partículas de aluminio aglomeradas cerca de zonas con porosidad. Se puede observar y comprobar que en la figura 71.1 mediante el análisis químico se encuentran elemento como el fierro, aluminio, sílice y calcio.

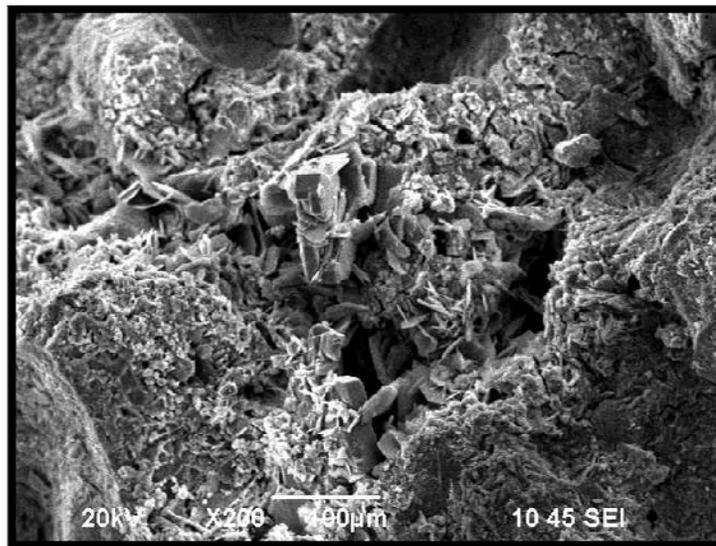


Figura 71. Micrografía de muestra con 30% de arena gastada en greña y 70% de arena de sílice “28 días de curado”, 200X 100µm.

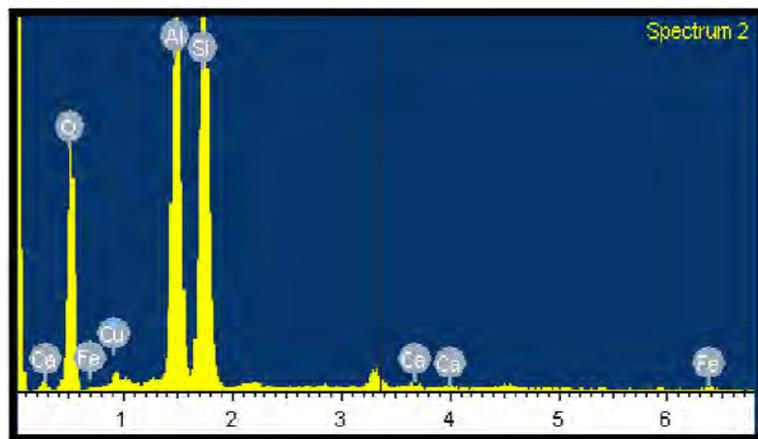


Figura 71.1 Análisis químico obtenido de la figura 71.

En la **figura 72**, se observa partículas de aluminio en la formación de poros dispersados en la muestra fabricada con arena gastada retenido en malla #100. Mediante el análisis químico mostrado en la **figura 72.1**, se observa que la muestra analizada en la figura 72, contiene elementos como el calcio, fierro y aluminio.

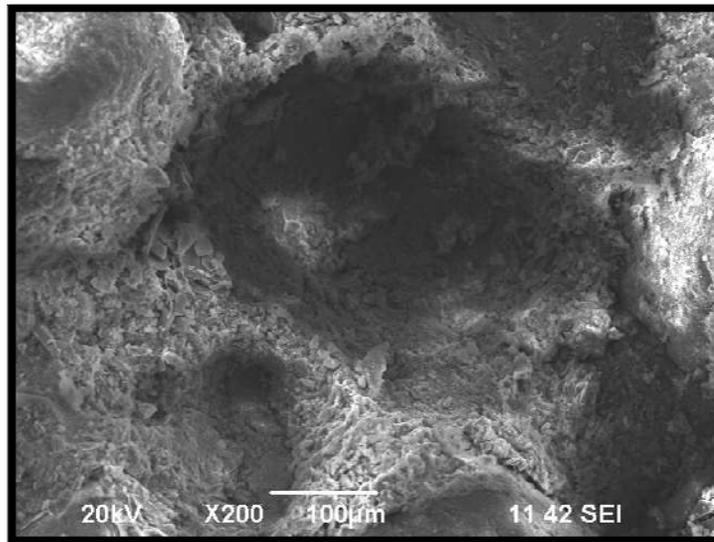


Figura 72. Micrografía de muestra con 30% de arena gastada retenida en malla #100 y 70% de arena de sílice "7 días de curado", **200X 100µm**.

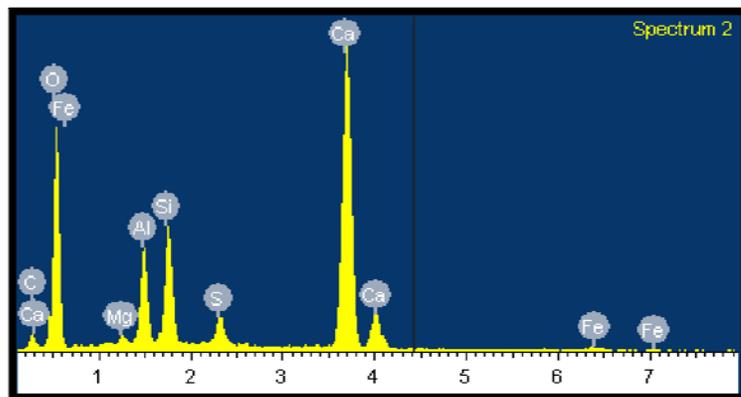


Figura 72.1. Análisis químico obtenido de la figura 72.

En la **figura 73**, se observa partículas de aluminio y fierro dispersadas en la muestra analizada a 28 días. En la figura 73.1, mediante el análisis químico se puede comprobar que se encuentran elementos químicos como aluminio, fierro, calcio y sílice.

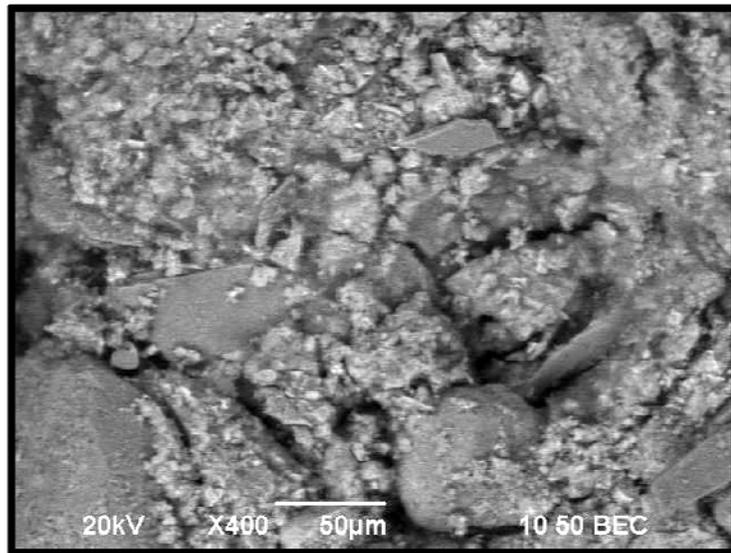


Figura 73. Micrografía de muestra con 30% de arena gastada retenida en malla #100 y 70% de arena de sílice “28 días de curado”, 400X 50µm.

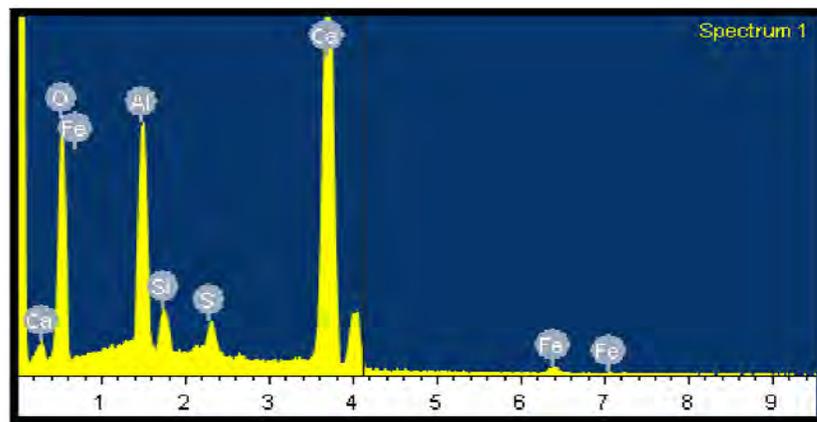


Figura 73.1. Análisis químico obtenido de la figura 73.

En la **figura 74**, se observa partículas de aluminio, hierro y de sílice dispersadas en la muestra fabricada con arena gastada retenido en malla #200. En la figura **74.1**, mediante el análisis químico se puede observar el contenido de elementos de aluminio, hierro, sílice, calcio y azufre.

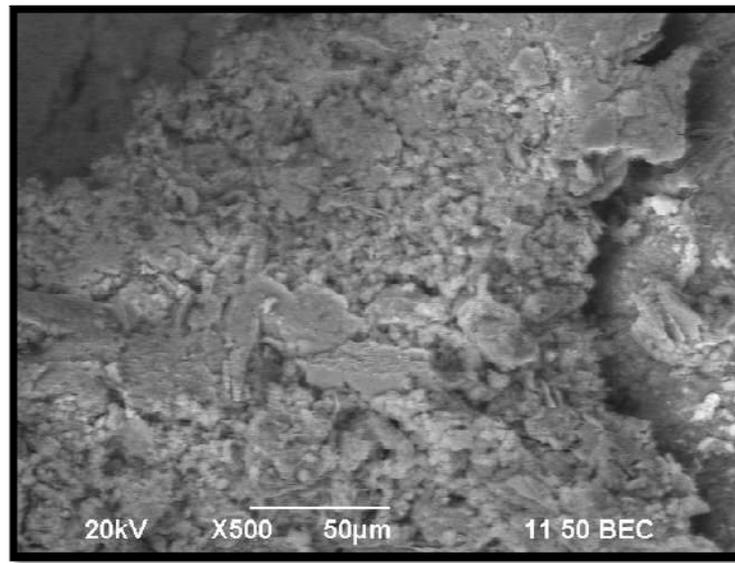


Figura 74. Micrografía de muestra con 30% de arena gastada retenida en malla #200 y 70% de arena de sílice "7 días de curado", 500X 50µm.

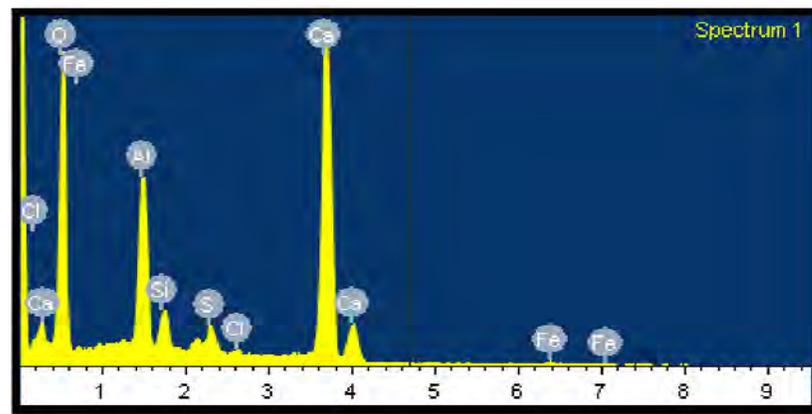


Figura 74.1. Análisis químico obtenido de la figura 74.

En la **figura 75**, se observa partículas de aluminio, formación de poros dispersados en la muestra fabricada con arena gastada retenido en malla #200. En la **figura 75.1**, se puede comprobar mediante el análisis químico el contenido de elementos como el aluminio, fierro, calcio, azufre y otros más.

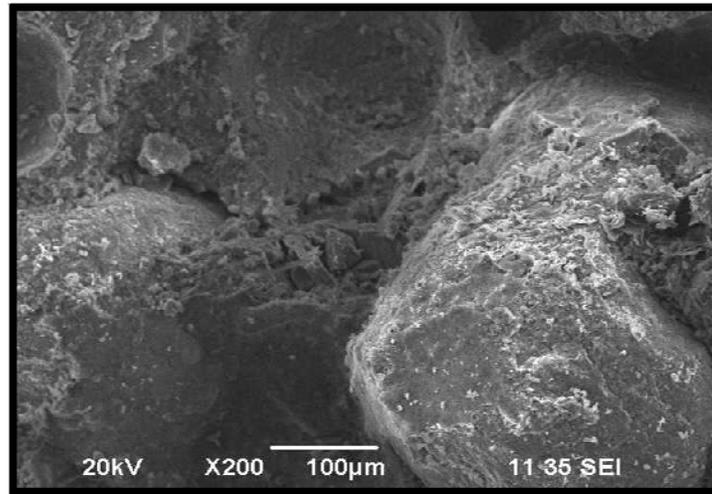


Figura 75. Micrografía de muestra con 30% de arena gastada retenida en malla #200 y 70% de arena de sílice "14 días de curado", 200X 100µm.

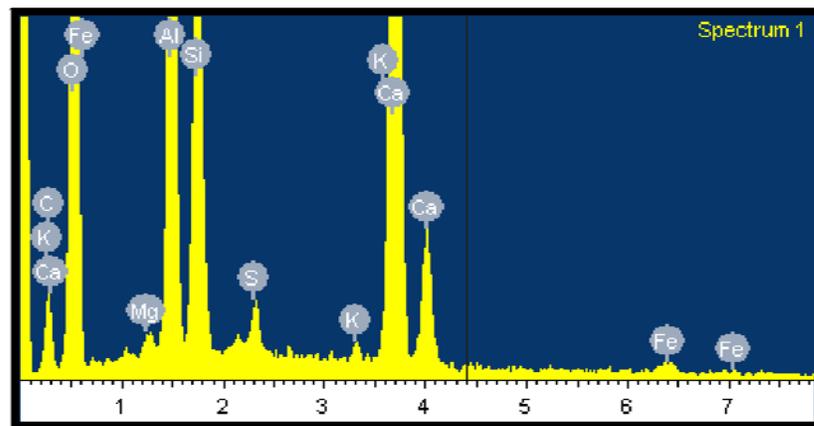


Figura 75.1. Análisis químico obtenido de la figura 75.

La durabilidad de las posibles aplicaciones que pueden tener las mezclas evaluadas será un factor determinante en el uso de las mismas, considerando la tasa de carbonatación, tamaño de poros, absorción de agua y el efecto de los elementos contaminantes que se presentan durante el reuso de la arena gastada sobre todo, si se encuentra reforzamiento dentro del sistema cementante ^[86,87]. El modo de falla en compresión mostró una trayectoria preferencial recorriendo las zonas donde partículas metálicas se encontraban embebidas, debido a la falta de adherencia entre la pasta y estas partículas y a la formación de poros.

CAPÍTULO VII



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusión general.

El reemplazo de la arena gastada modificó la matriz cementante de las pastas de cemento portland de la siguiente manera:

a) Se modificó la temperatura de reacción debido al contenido de aluminio en la arena gastada, b) incrementó la expansión en los morteros experimentales fabricados, c) modificó la estructura interna del mortero formando huecos, d) modifico el modo de falla debido a la falta de adherencia de las partículas metálicas. La suma de estos factores provocó que la microestructura de la matriz cementante fuera menos compacta, así como una menor resistencia a la compresión en los morteros fabricados. La resistencia a la compresión resultante con el 30% de remplazo de arena gastada, hace viable la utilización en aplicaciones de resistencia normal. Cuando la expansión es una aplicación requerida, las adiciones de arena gastada modifican el comportamiento del CPO a un cemento hidráulico expansivo de acuerdo a los estándares vigentes, dando ventajas en la industria de la construcción ya que puede servir como grout, especializado para el relleno de espacios.

Conclusiones particulares.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se tienen las siguientes conclusiones particulares:

- 1.- Las partículas de aluminio es un factor asociado a la porosidad del mortero y las mismas se relacionan con la reducción de resistencia del material y el incremento en la temperatura y expansión.
- 2.- El tamizado mediante malla #200 no ayuda a incrementar la resistencia del concreto debido a que las partículas del aluminio se encuentran en otro orden de magnitud.
- 3.- La utilización del material con 30% de reemplazo se puede realizar en donde las características químicas de los morteros no afecten al entorno. Se considera que la reducción de resistencia es significativa cuando se reemplaza el agregado fino por arena gastada pero, un enfoque hacia materiales de baja resistencia controlada CLSM es una alternativa viable y el

reemplazo de arena gastada puede incrementarse. El efecto de utilizar un proporcionamiento basado en ASTM, resulta en una mayor resistencia a comparación del proporcionamiento M^3 , esto debido al mayor consumo de cemento y sacrificando la cantidad de arena en peso consumido.

4.-Fué posible asociar microestructuralmente la presencia de partículas de aluminio con la porosidad presente en los morteros, lo anterior mediante la técnica de MEB.

5.- La temperatura de reacción de hidratación medida mediante un calorímetro semi-adiabático es un parámetro importante que indica el periodo de tiempo en donde ocurre la mayor temperatura y junto con ésta se puede evaluar la expansión debido a los elementos incursores de aire.

6.- Los resultados presentan una alternativa viable para el reuso de los subproductos tipo arena gastada de fundiciones no ferrosas en aplicaciones comunes y que pueden ser utilizadas dentro de las mismas empresas que lo producen, limitando su dosificación y estableciendo los límites de expansión y de compresión en su aplicación.

7.- El estudio detallado de las características químicas, térmicas, físicas y mecánicas de los materiales subproductos es un enfoque de mucho valor para aprovechar materiales los cuales que se consideran desechos tomando siempre en cuenta las regulaciones de impacto ambiental internacionales.

7.2 Recomendaciones

1. Relacionar el porcentaje de porosidad, tamaño de poros y distribución de los mismos con diferentes porcentajes de agregado en reemplazo.
2. Evaluar el efecto del agregado fino reciclado a partir de arena gastada con las propiedades a largo plazo y determinar los factores que más afectan la durabilidad de los morteros.
3. Evaluar el uso de arenas gastadas con un enfoque de mezclado en dos etapas y su efecto sobre las propiedades en estado fresco y estado endurecido.
4. Ensayar las arenas gastadas dentro de materiales de construcción de baja resistencia controlada y observar el efecto de mayores adiciones en reemplazo.

5.- Evaluar el posible uso de las arenas gastadas para producir concretos de contracción compensada.

Referencias bibliográficas

- 1 R.L Naro, ASI International, Ltd, Cleaveland Ohio, Influence of Chemical Binder Core Sand Contamination on Green Sand Molding Properties.
- 2 Core Manufacturing Hydro, Hydro Aluminum, 18-23.
- 3 Noram Technology, moving away from silica sand, Kent Harris.
- 4 Carlos Torres Torres, sistemas de aglutinamiento químico, Instituto tecnológico de saltillo, 1997.
- 5 “El Proceso Ashland”, Ashland Chemical, Mexico, 1999,1-16.
- 6 U.S. Sílica, Modern Casting, February, E.U.A, 2002, 4.
- 7 “ASM Casting Handbook” Vol. 15, 2nd Edition, E.U.A, 1992, 209, 219, 220.
- 8 R. Laitar, C.K. Jhonson, hight host strength phenolic urethane coldbox systems, Acme Resin Corp, forest Ark, Il, AS Transactions 1986, vol 94 pag 187.
- 9 FOSECO Silicate bonded moulding sand, 1-3. FOSECO.
- 10 Paul R. Carey, Ashland Chemical co, Columbus OH.
- 11 Minimización de Residuos demostrar los beneficios en la construcción, S et al Coventry, Londres: CIRIA 2001.
- 12 B Edwards y Turrent D (Eds.) Principios y Práctica de Vivienda Sostenible (Londres: E & FN Spon, 2000).
- 13 “Mold and Core Test Handbook”, American Foundrymens Society, 2nd Edition, E.U.A, 1, 2, 263.
- 14 Desarrollo sustentable, Filiberto Alcocer Barrera.
- 15 Sand Binder Systems”, Foundry Management Technology, Penton Publication, E.U.A. 1989, 3-12.
- 16 Vallone Flores L, García Vallejo R, “Influencia del a composición de resinas y su concentración en la resistencia a la tensión de corazones de arena”, Programa de Evaluación Final, U de M, México, 1999, 13 – 20.
- 17 Alternative granular media for the metal casting industry; P.J. Guichelaar. S.N. Ramrattan, R.E. Tieder, Septiembre 1995.

- 18 "Chemically Bonded Core and Molds", American Foundrymens Society, E.U.A, 1987, 1 – 7.
- 19 Askeland Donald R, "Ciencia e Ingeniería de los materiales", Tercera Edición, México, 2001, 405.
- 20 "Manual de entrenamiento para el porceso de caja fria" Deltha-HA, Mexico, 2001, 9-15.
- 21 MOEE. Spent Foundry Waste Sand - Alternative Uses Study. Report prepared by John Emery Geotechnical Engineering Limited for Ontario Ministry of the Environment and Energy and the Canadian Foundry Association, Queen's Printer for Ontario, July, 1993.
- 22 Javed, S., and C. W. Lovell. Use of Waste Foundry Sand in Highway Construction. Final Report, Project No. C-36-50N, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1994.
- 23 Naik, T.R., and Singh, S.S, (1997), Flotable slurry containing foundry sands. J. Mat. In Civil Engg, ASCE, 9(2), 92-102.
- 24 Stark, T., Eid, H., 1994. Drained residual strength of cohesive soils. J. Geotech. Engg, ASCE, 120 (5), 856-871.
- 25 Naik, T.R., Kraus, N., Rudolph, W. Bruce and Siddique Rafat. Precast concrete products using by-products, ACI Materials Journal, 101, No. 3, pp 199-206.
- 26 CHARACTERIZATION OF FOUNDRY SAND WASTE, Eric S. Winkler, Ph.D. - Principal Investigator Alexander A. Bol'shakov, Ph.D. - Project Engineer Center for Energy Efficiency and Renewable Energy University of Massachusetts at Amherst(pag.7).
- 27 Turning Used Foundry Sand Into A Marketable Resource, (AFS) American Foundry Society. Flowable fill. Pag. 4.
- 28 Beneficial Utilization of Used Foundry Sands as Construction Materials. Tarun R. Naik. Director, Center for By-Products Utilization. Universidad de Wisconsin.
- 29 Characterisation of Mineral Wastes, Resources and Processing technologies – Integrated waste management for the production of construction material. Dr Evaggelia Petavratzi Scott Wilson. November 2007.
- 30 REPORT ON USE OF RECYCLED FOUNDRY SAND IN THE CLEVELAND AREA. January 29, 2003.
- 31 Naik TR, Kraus RN, Chun YM, Ramme WB, Siddique R (2004). Precast concrete products using industrial by-products.pag. 390.
- 32 Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete. Rafat Siddique, Geert de Schutter, Albert Noumowe. Pag. 976-980.

- 33 Foundry Sand Facts for Civil Engineers; Foundry Sand in Structural Fills and Embankmentst; First Printing, May 2004 FHWA-IF-04-004.Charter 2. Pag. 15.
- 34 ASTM C 33-04. Standard Specification for Concrete Aggregates.
- 35 Foundry Sand Facts for Civil Engineers; Foundry Sand in Portland Cement Concrete; First Printing, May 2004 FHWA-IF-04-004.Charter 6. Pag. 50.
- 36 Foundry Sand Facts for Civil Engineers; Foundry Sand in Portland Cement Concrete; First Printing, May 2004 FHWA-IF-04-004.Charter 6. Pag. 53.
- 37 Naik TR, Kraus RN, Chun YM, Ramme WB, Siddique R (2004). Precast concrete products using industrial by-products.pag. 391.
- 38 ASTM C144 - 04 Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar.
- 39 39. Naik TR, Kraus RN, Chun YM, Ramme WB, Siddique R (2004). Precast concrete products using industrial by-products.pag. 392.
- 40 Javed, S., C. W. Lovell, and L. E. Wood. "Waste Foundry Sand in Asphalt Concrete," Transportation Research Record 1437. Transportation Research Board, Washington, DC, 1994.
- 41 Ciesielski, S. K. and R. J. Collins. Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board, Washington, DC, 1994.
- 42 Foundry Sand Facts for Civil Engineers; Foundry Sand in Hot Mix Asphalt; First Printing, May 2004 FHWA-IF-04-004.Charter 4. Pag. 38.
- 43 American Foundrymen's Society. Alternative Utilization of Foundry Waste Sand. Final Report (Phase I) prepared by American Foundrymen's Society Inc. for Illinois Department of Commerce and Community Affairs, Des Plaines, Illinois, July, 1991.
- 44 Foundry Sand Facts for Civil Engineers; Foundry Sand in hot Mix Asphalt; First Printing, May 2004 FHWA-IF-04-004.Chapter 4. Pag. 37.
- 45 Foundry Sand Facts for Civil Engineers; Foundry Sand in hot Mix Asphalt; First Printing, May 2004 FHWA-IF-04-004.Chapter 4. Pag. 40.
- 46 Foundry Sand Facts for Civil Engineers; Foundry Sand in hot Mix Asphalt; First Printing, May 2004 FHWA-IF-04-004.
- 47 Naik TR, Kraus RN, Chun YM, Ramme WB, Siddique R (2004). Precast concrete products using industrial by-products.pag. 393.

- 48 Beneficios de la reutilización de arena de fundición gastada. CAQ, Socio Director de la Asociación de Reciclaje de Asistencia Tecnológica (RETAP).
- 49 Tecnología del concreto; Adam M. Neville. IMCYC. Capítulo I. pag. (1-36).
- 50 ASTM C 150-05 - Standard Specification for Portland cement.
- 51 NMX-C-414-03-ONNCCE "Norma Mexicana, Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Prueba".
- 52 Moraño Rodríguez, Alfonso J. Departamento de Materiales de Construcción. Influencia en las características mecánicas de adiciones de calizas..
- 53 ASTM C 778-04 - Standard Specification for Standard Sand.
- 54 ASTM C 188-04 – Standard Test Methods for Density of Hydraulic Cement.
- 55 ASTM C 114-04 - Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.
- 56 Eric Lifshin, X- ray Characterization of materials, Wiley – VCH.
- 57 ASTM C 430-04 - Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μ m (No. 325) Sieve.
- 58 NMX C 165 ONNCCE. Determinación de la masa específica y absorción del agregado fino.
- 59 NMX C 30 ONNCCE. Industria de la construcción – agregados – muestreo.
- 60 NMX C 170 ONNCCE. Industria de la Construcción – Agregados - Reducción de muestras de agregados obtenidas en el campo, al tamaño requerido para las pruebas.
- 61 NMX C 077 ONNCCE. Industria de la construcción – agregados granulométricos finos y gruesos.
- 62 ASTM C 305-04 - Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.
- 63 ASTM C 511-04 - Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes.
- 64 ASTM C 109-04 - Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar.
- 65 ASTM C 185-04 - Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar.

- 66 ASTM C 1437-04 - Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.
- 67 ASTM C 191-04 - Standar Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.
- 68 Practical Semi-adiabatic Calorimetry for concrete Mixture Evaluation. Holcim. Semptember 23,2008.
- 69 Naik TR, Kraus RN, Chun YM, Ramme WB, Siddique R (2004). Precast concrete products using industrial by-products.
- 70 ASTM C 33-05. Standard Specification for Concrete Aggregates.
- 71 ASTM D 3897-85 Standard Test Method for Shake Extraction of Solid Waste with Water.
- 72 Robert S. Dungan a,* , Nikki H. Dees; The characterization of total and leachable metals in foundry molding sands; Journal of Environmental Management 90 (2009) 539-548).
- 73 An Deng a, Paul J. Tikalsky; Geotechnical and leaching properties of flowable fill incorporating waste foundry sand; Waste Management 28 (2008) 2161–2170).
- 74 N. Reddi, G. P. Riecka, A. P. Schwabb, S. T. Chouc and L. T. Fan; Stabilization of phenolics in foundry waste using cementitious materials; Journal of Hazardous Materials Volume 45, Issues 2-3, February 1996, Pages 89-106.
- 75 Ulla-Maija Mroueh, Margareta Wahlstro m; By-products and recycled materials in earth construction in Finland—an assessment of applicability; Resources, Conservation and Recycling 35 (2002) 117–129.
- 76 Controlled low-strength materials (CLSM) (ACI 229R-99). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- 77 Rafat Siddique; Utilization of waste materials and by-products in producing controlled low-strength materials; Resources, Conservation and Recycling 54 (2009) 1–8.
- 78 Guney, Y., et al. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. Waste Management (2010), doi:10.1016/j.wasman.2010.02.018).
- 79 Jianzhuang Xiao, Jiabin Li, Ch. Zhang; Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading ; Cement and Concrete Research 35 (2005) 1187– 1194).
- 80 L. Evangelista a, J. de Brito; Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates ; Cement & Concrete Composites 29 (2007) 397–401.

- 81 Sami W. Tabsh *, Akmal S. Abdelfatah; Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete; *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1163–1167.
- 82 Khay SEE et al. Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements. *Constr Build Mater* (2010), doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.008).
- 83 Vivian W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam; Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach; *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1195– 1203.
- 84 K. Bairagi, ME, H.S. Vidyadhara B.E, and Kishore Ravande B.E.; Mix design procedure for recycled aggregate concrete; *Construction and Building Materials* Volume 4, Issue 4, December 1990, Pages 188-193).
- 85 R. Pigache, Etude et realisation d'un béton cellulaire autoclave à base de Loess, Thèse 3ème cycle, Géologie Appliquée, Universié de Lille-France, 1978, 199 pp.).
- 86 S. M. Levy and P. Helene, Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development, *Cement and Concrete Research* Volume 34, Issue 11, November 2004, Pages 1975-1980).
- 87 L. Evangelista, J. de Brito, Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement & Concrete Composites* 32 (2010) 9–14).

Glosario de términos

Absorción: es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado como un porcentaje de la masa seca.

Aglomerantes: Sustancia que a manera de pegante se agrega a otra o una mezcla de otras para lograr la unión de sus partículas.

AFS: Sociedad Americana de Fundidores.

Aleación: Sustancia que tiene propiedades metálicas y que está compuesta por dos o más elementos químicos de los cuales al menos uno es un metal.

Almacenamiento o acumulación: Se refiere a la conservación de residuos en un sitio y por un lapso determinado.

Arena de sílice: Material cuyo rango granulométrico comprende de 1/16 a 2 mm de diámetro. Su composición química la constituye íntegramente el bióxido de silicio (SiO_2).

Arena de fundición: Son las arenas utilizadas durante el proceso de fabricación de piezas, comúnmente metálicas, consisten en fundir un material e introducirlo en una cavidad, llamada molde, donde se solidifica. Típicamente sub-angular a forma redonda.

Arena gastada en greña: Arena utilizada para la fabricación de moldes en los cuales se vierte el aluminio fundido una vez que ha sido solidificado, estos moldes son destruidos y depositados en grandes bancos de arena, como consecuencia del uso en fundición pierde sus propiedades mecánicas y al ser desechada es mezclada con diferentes tipos de residuos orgánicos e inorgánicos. Esta condición no contempla ningún tipo de acondicionamiento.

Arena gastada retenida en malla #100: A esta arena se le realizó un acondicionamiento, cribando por la malla #100.

Arena gastada retenida en malla #200: A esta arena se le realizó un acondicionamiento, cribando por la malla #200.

Asfalto: es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes.

Calor de hidratación: Calor producido por el proceso de hidratación como sucede durante el fraguado y endurecimiento del cemento Pórtland.

Cemento hidráulico: Es un material inorgánico pulverizado, comúnmente conocido como cemento, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer.

CPC 30R: Cemento Pórtland Compuesto

CPO 40: Cemento Pórtland Ordinario

Colada: Vertido del material fundido.

Contracción: Reducción dimensional que acompaña al endurecimiento (solidificación) del metal que pasa del estado fluido al estado sólido.

Crisol: Recipiente en el cual se vacía la aleación de metal fundido a la caja del molde.

Densidad específica: es una de las propiedades más características de cada sustancia.

Distribución granulométrica: Es una distribución para conocer el tamaño de los granos. Su procedimiento se realiza pasando arena seca y lavada por once tamices sucesivos con aberturas de mallas sucesivas y numeradas según la cantidad de mallas por pulgada lineal.

Expansión: Aumento de la dimensión longitudinal de un cuerpo cuando se aumenta su temperatura de 0° C a 1° C.

EPA: Agencia de Protección Ambiental.

Fusión: Acción y efecto de fundir o fundirse.

Horno: Recipiente en el que se funde la aleación de metal.

Material aglutinante: son aquellos materiales con consistencia variable, tienen la propiedad de poderse moldear, de adherirse fácilmente a otros materiales, de unirlos entre sí, protegerlos, endurecerse y alcanzar resistencias mecánicas considerables.

Mortero: es una combinación de aglomerantes y aglomerados. Los más comunes son los de cemento y están compuestos por cemento, agregado fino y agua.

Pavimentos: es la capa constituida por uno o más materiales que se colocan sobre el terreno natural o nivelado, para aumentar su resistencia y servir para la circulación de personas o vehículos.

Pérdidas por ignición (L.O.I): Esta técnica comprende la medición de la pérdida de peso de la muestra después de realizar una combustión seca del material orgánico; el procedimiento analítico varía ampliamente con respecto a la temperatura y tiempo de combustión.

pH: es una medida de la acidez o de la alcalinidad de una sustancia.

Poros: sistemas de vacíos presente en la estructura interna del concreto endurecido.

Rebabas: Exceso de material resultante de la fabricación del artículo.

Rechupe: Cavidad debida a la contracción, originada por el enfriamiento desigual del metal en el molde. Se sitúa en la zona que solidifica en último lugar.

Reciclaje: Recuperación de residuos peligrosos o de materiales presentes en ellos, por medio de las operaciones, para ser utilizados en su forma original o previa transformación, en la fabricación de otros productos en procesos productivos distintos al que los generó.

Residuo o desecho: Sustancia, elemento u objeto que el generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar.

Residuo peligroso: Residuo o mezcla de residuos que presenta riesgo para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente, ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto, como consecuencia de presentar algunas de las características de toxicidad, inflamabilidad, reactividad y corrosividad.

Resinas: Son sustancias naturales o sintéticas. Las naturales provienen de la secreción de las plantas con aspecto y propiedades más o menos análogas a las de los productos así denominados y las sintéticas se obtienen mezclando otros productos, tales como fenol.

Reúso: Recuperación de residuos peligrosos o de materiales presentes en ellos por medio de las operaciones señaladas, para ser utilizados en su forma original o previa transformación como materia prima sustitutiva en el proceso productivo que les dio origen.

Resistencia a compresión: se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial.

Terraplenes: se denomina terraplén a la tierra con que se rellena un terreno para levantar su nivel y formar un plano de apoyo adecuado para hacer una obra.

Tolva: Especie de embudo construido para formar la cavidad en la caja de molde para el ingreso del metal fundido.

Tratamiento: Todo proceso destinado a cambiar las características físicas y/o químicas de los residuos peligrosos, con el objetivo de neutralizarlos, recuperar energía o materiales o eliminar o disminuir su peligrosidad.

A.D.V: Valor de la demanda ácida.