



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MORTERO

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN ARQUITECTURA

PRESENTA:
ARQ. SOFIA BEATRIZ VARGAS LOPEZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. ALBERTO MUCIÑO VÉLEZ
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y PAISAJE

MIEMBROS DEL COMITE TUTOR:
DR. ELIGIO A. OROZCO MENDOZA
INSTITUTO DE FÍSICA,
DR. LAURO BUCIO GALINDO
INSTITUTO DE FÍSICA
DRA. GEMMA LUZ S. CHIRINO VERDUZCO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
M. EN ING. PERLA R. SANTA ANA LOZADA
FACULTAD DE ARQUITECTURA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



El trabajo de investigación asociado a la presente tesis se realizó en el marco del proyecto PAPIIT IN100417, titulado: *“Siembra de Nanopartículas de fosfatos naturales para mejorar el desempeño mecánico de pastas de cemento con agregados pétricos”*, bajo la dirección del doctor en Arquitectura Alberto Muciño Vélez y la asesoría técnico-científica de los doctores en Física, Lauro Bucio Galindo y Eligio Alberto Orozco Mendoza.

COMITÉ TUTOR:

DR. ALBERTO MUCIÑO VÉLEZ

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y PAISAJE, UNAM

DR. ELIGIO ALBERTO OROZCO MENDOZA

INSTITUTO DE FISICA, UNAM

DR. LAURO BUCIO GALINDO

INSTITUTO DE FISICA, UNAM

DRA. GEMMA LUZ SILVIA VERDUZCO CHIRINO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, UNAM

M. EN ING. PERLA SANTA ANA LOSADA

FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM

“Después de todo, ¿qué es un científico entonces?
Es un hombre curioso que mira a través del ojo de
una cerradura, la cerradura de la naturaleza,
tratando de saber qué es lo que sucede.”

Jacques Yves Cousteau

The background features a complex network diagram with numerous nodes and connecting lines. A large, solid magenta arrow points from the left side of the page towards the right, partially overlapping the network. The word "AGRADECIMIENTOS" is written in white, uppercase letters across the magenta arrow.

AGRADECIMIENTOS

Este documento representa la culminación del trabajo de investigación y, el inicio de una nueva etapa. Para lograrlo siempre conte con el apoyo, impulso y cariño de las personas que me rodean. Es por ello que quiero expresarles un sincero agradecimiento:

En primer lugar, a Dios.

Porque día con día me permite saber que estoy en un lugar privilegiado, rodeada de una valiosa familia, amigos y compañeros. Pero sobre todo por la oportunidad culminar este trabajo, por su amor y bondad.

A mi mamá, Nery.

Por ser la mejor mujer, madre y amiga. Por nunca dejarme sola en el camino hasta hoy recorrido, por alentarme a conseguir mis sueños y no permitir que me de por vencida. Siempre corriges mis errores y celebras mis triunfos, este logro es tan tuyo como mío. Gracias, sin ti esto no hubiese sido posible.

A mi hermano, Guillermo.

Gran cómplice y compañero de vida. Gracias porque a tu manera has vivido conmigo esta aventura, alentándome en los momentos difíciles, compartiste alegrías, tristezas y retos. Eres parte fundamental de mi vida. ¡Nunca cambies!

A Rodrigo.

Por compartir este sueño conmigo, por los muchos momentos vividos. Gracias por tu ayuda, pero sobre todo por tu amor y paciencia.

A mis abuelos, Elisauro[†] y Felicia[†].

Sé que desde donde están celebran este triunfo conmigo, tengan por seguro que gran parte de esto se debe a ustedes. Gracias por su amor y apoyo.

A mi familia.

Tíos, primos y sobrinos. No existen palabras suficientes para agradecerles por todo su apoyo a lo largo de estos años, este logro también les pertenece.

Al Dr. Alberto Muciño Vélez.

Tutor, compañero y amigo. Bajo su guía lo difícil se volvió fácil; gracias por creer en mi para realizar esta investigación, por la paciencia, dedicación, el conocimiento transmitido y la motivación en mi formación como investigadora.

Al Dr. Eligio Orozco y Dr. Lauro Bucio

Por el conocimiento transmitido, por el apoyo y la oportunidad para realizar esta investigación bajo su tutela.

A la Dra. Nora A. Pérez Castellanos.

Guía, amiga y compañera. Gracias por las eternas horas de enseñanza, por tu paciencia y dedicación para culminar esta investigación.

A la Dra. Gemma Verduzco y la maestra Perla Santa Ana Lozada.

Por todo el apoyo, consejos y confianza para la realización de esta investigación. Ha sido un enorme privilegio poder trabajar y reforzar los conocimientos adquiridos bajo su guía.

A mis amigos.

Quienes al paso de los años se han vuelto mis hermanos y grandes cómplices, gracias por compartir momentos inolvidables, nunca podre pagarles el apoyo incondicional y cariño que me brindan.

Durante la realización de este proyecto conté con el apoyo de magníficas personas que se volvieron parte importante de mi vida, en ellos encontré una segunda familia: Leticia Trejo, Ángel Osornio, Erendida Martínez, Germain Castro, Yoshamine Moreno, Gabriela García, Edrey Salgado, Bárbara Ramírez, Samanta Pérez y Antonio Tahuiton gracias por la ayuda brindada y, por todos los momentos compartidos en el laboratorio.

A mis compañeros, maestros, tutores y guías dentro de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, por la oportunidad brindada para realizar esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado.

Al Laboratorio de Cristalografía y Materiales Naturales, al Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural LANCIC del Instituto de Física de la UNAM y, al Laboratorio CODICE de la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural del INAH por todo el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A todos los antes mencionados:

¡Gracias por creer en mí!

ÍNDICE

Introducción.....	9
I. Hipótesis.....	12
II. Objetivo general.....	13
III. Objetivos específicos.....	13
IV. Justificación.....	14
V. Origen del proyecto.....	14
Planteamiento de la investigación.....	16
1.1. Los factores ambientales y su influencia en las mezclas de cemento.....	18
El mortero y sus componentes.....	20
2.1. El mortero.....	21
2.2. Clasificación del mortero.....	21
2.3. Material y agregado del mortero.....	22
2.3.1. El cemento portland.....	22
2.3.2. Agregados pétreos.....	30
2.3.3. Agua.....	36
2.4. Influencia de los agregados finos en las características del mortero.....	38
Procedimiento experimental.....	40
3.1. Método experimental.....	41
3.2. Materiales empleados.....	42
3.2.1. Agregado fino (arena de construcción).....	42
3.2.2. Cemento.....	42
3.2.3. Agua.....	42
3.2.4. Elaboración de muestras.....	43
3.2.5. Mezcla empleada para la evaluación de morteros.....	44
3.3. Técnicas de caracterización.....	45
3.3.1. Identificación de sales solubles.....	45
3.3.2. Microscopia Óptica.....	46
3.3.3. Microscopia Electrónica de Barrido.....	48
3.3.4. Difracción de Rayos X (DRX).....	50
3.3.5. Identificación de fases y análisis Rietveld.....	52

3.3.6. Pruebas mecánicas	52
Análisis y discusión de resultados	54
4.1. Identificación de sales solubles mediante tiras reactivas	55
4.2. Análisis petrográfico de las arenas empleadas	55
4.3. Análisis de morfología e identificación mineralógica de las arenas y cementos mediante microscopia electrónica de barrido.....	58
4.4. Identificación de fases mineralógicas mediante Difracción de Rayos X-DRX y refinamiento Rietveld de arenas y cementos	65
4.5. Pruebas de resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de mortero	71
4.6. Análisis de las mezclas de mortero mediante microscopia óptica	72
Conclusion	75
Bibliografía	78
Abreviaturas	82
Glosario	83

The background features a complex network diagram with numerous nodes and connecting lines. A large, solid magenta triangle is positioned on the left side, pointing towards the right. The text 'INTRODUCCIÓN' is centered within this triangle in a light gray, sans-serif font.

INTRODUCCIÓN

En México se construyen cerca de 1 millón de viviendas por año, de las cuales el 63% se producen mediante autoconstrucción. Para el año de 2014 las principales casas cementeras del país ya comercializaban un cemento tipo “mortero” dirigido al sector del autoconstrucción; ya que esta había crecido un 5% en el primer trimestre de dicho año.

En la construcción existen aplanados de mortero, que son la aplicación de mezclas en muros y plafones que les proporciona un recubrimiento que puede o no ser el acabado final de dicho elemento. Pero, también existen morteros para pegar bloques, mampostería, recubrimientos y realizar reparaciones de grietas.

El cemento tipo Portland y sus derivados, morteros y concretos; siguen siendo los materiales más empleados en la industria de la construcción; esta actualmente exige una evolución en los procesos constructivos, y estos a su vez un mejor aprovechamiento de los materiales. El cemento portland está compuesto principalmente de silicatos que reaccionan con el agua y hacen que endurezca; la mezcla del cemento y agua es llamada pasta de cemento, la pasta de cemento al ser mezclada con las arenas de construcción actúa como pegamento entre las partículas.

Sin embargo, a pesar de ser un material muy utilizado desde nuestros ancestros, actualmente la industria de la construcción se enfrenta a nuevos retos de diseño, que para poder ser construidos lleva a los materiales de construcción a nuevos límites. Los morteros al igual que el concreto son un material económico debido a los materiales que lo conforman y, aunque la industria no ha logrado modificar la forma en que se fabrica el cemento portland hemos sido testigos de una importante evolución técnica y científica que ha obligado a generar investigación en este tipo de materiales.

La técnica de los morteros ha ido evolucionando con el mundo, y conforme la industria de la construcción se vuelve más exigente en las características físicas, químicas y mecánicas de los materiales.

Con el transcurso del tiempo en la historia, se encuentra que a partir del primer tercio del siglo XIX con la patente de Joseph Apsdin de “un cemento tan duro como una piedra”, todos los cementos producidos a partir de 1850 lo fueron con métodos modernos, moliendo la cal y la arcilla en un molino

húmedo y calcinando la mezcla a temperaturas entre 1300° y 1500° C. Desde el final del siglo XIX, los principios generales de la fabricación del cemento Portland no se han modificado.

Debido a la gran diversidad de bancos de arena que existen en el país, es necesario investigar el comportamiento mecánico de las mezclas de cemento y arena para generar un mortero. La presente investigación planteó el estudio físico, químico y mecánico de los morteros de cemento portland elaborados con las arenas de construcción que se comercializan en México, generando así un estudio multidisciplinario para reunir los diversos enfoques de cada una de las disciplinas.

Para delimitar el estudio, se utilizaron tres marcas comerciales de cemento portland tipo I, elegidas debido a los resultados presentados en el trabajo "Caracterización de cementos tipo portland para su uso en elementos de construcción"¹ y tres tipos de arena definidos por su uso en el sureste y centro del país, lo que implicó un estudio a detalle desde el campo de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, de forma tal que se han relacionado las propiedades físico-químicas con la estructura y propiedades mecánicas de dichos materiales. Como resultado de dichos análisis se ha podido generar un diseño de mezcla que se adapta a la arquitectura regional.

¹ Salgado, E., Orozco, E. & Muciño, A. (10,2015) *Caracterización de cementos tipo portland para su uso en elementos de construcción*, En 4ª Reunión Nacional de Difractometría. Dirigida por la Sociedad Mexicana de Cristalografía. Acapulco, Guerrero.

HIPÓTESIS

Los bancos de extracción del cual provienen las arenas (gris, rosa y polvo de piedra) modifican las propiedades mecánicas de los morteros elaborados a base de Cemento Portland Tipo I.



OBJETIVO GENERAL

Medir y evaluar el comportamiento físico, químico y mecánico de las mezclas de cemento Portland Tipo I y los distintos tipos de arenas.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Comparar el comportamiento mecánico de diferentes arenas empleadas en la construcción en la República Mexicana
- Identificar las alteraciones de los morteros de cemento portland según el tipo de arena empleada
- Proponer el diseño de mezcla adecuado según el uso del mortero, sin incluir la optimización de la mezcla.

III. Justificación

La industria de la construcción se encuentra inmersa en una evolución constante, lo que ha ocasionado que esta se enfrente a nuevos retos para generar proporcionamientos adecuados de las mezclas de cemento portland que serán empleadas para la colocación de mampostería, bloques, acabados gruesos, acabados finos, etc.

IV. Origen del proyecto

El tema de investigación surge de la necesidad de la evolución tecnológica en los materiales de construcción, como se ha mencionado con anterioridad; debido a que el cemento es el material más utilizado en la industria a nivel mundial. Sin embargo, actualmente resulta sumamente importante optimizar los recursos de los que disponemos y, para ello es necesario generar diseños de mezclas adecuados al uso y ubicación del mismo, para contribuir con el uso adecuado de estos tipos de materiales.

Nuestro país cuenta con una capacidad instalada de alrededor de 50 millones de toneladas anuales, la producción esta soportada por tres grandes compañías cementeras que controlan el 85% del mercado; "CEMEX" que cuenta con 15 plantas de producción, "HOLCIM" con 6 plantas de producción y "Cooperativa Cruz Azul" con 3 plantas de producción. Adicionalmente existen 13 plantas más distribuidas de la siguiente manera: "Cementos y Concretos Nacionales" 4 plantas, "Grupo Cemento de Chihuahua" 3 plantas, "Cementos Fortaleza" 3 plantas y "Cementos Moctezuma" 3 plantas²

Desde el año 2013 las compañías cementeras se encuentran comercializando cemento para albañilería, producto que tiene como principal consumidor a la población en general, ya que este ha sido destinado como material para autoconstrucción. Motivo por el cual el consumo de cemento por habitante nuevamente se encuentra al alza después del año 2014, según se reporta en la tabla 1.

² Babu, G. & Martínez, S. (2008, enero). *Evolución reciente de la industria de cemento: un estudio comparativo entre México y la India*. PORTES, 2, 165 - 202.

Tabla 1. Producción y consumo del cemento en México de 2009 a 2014

AÑO	PRODUCCIÓN	CONSUMO NACIONAL (MILLONES TONS.)	HABITANTES	KGS/HABITANTE
2009	35.1	34.4	107,550,697	321
2010	34.5	33.9	112,336,538	301
2011	35.4	34.4	114,975,406	299
2012	36.2	34.6	116,901,761	295
2013	34.6	32.7	118,395,054	276
2014	36.6	35.2	119,713,203	294

Fuente: basado en la información proporcionada por la CANACEM³

México cuenta con una amplia variedad de materiales en cuales se encuentran las arenas que son empleadas como agregado fino en las mezclas de cementos, así como diversidad en las marcas comerciales de cemento portland. La edificación tiene una relación directa con los procesos constructivos, hecho que motivado a investigadores a nivel mundial a realizar estudios sobre los bancos de materiales que permitan obtener resultados con aplicación directa a los procesos en las obras.

Chan, J. et Al, (2003) concluye que los agregados de piedra caliza presentan una amplia variabilidad en sus características de acuerdo a las condiciones geológicas en las que se sedimentaron.⁴ Por su parte Cecilia Olague Caballero en el libro "Agregados para concreto"⁵ demuestra que las arenas y gravas deben ser caracterizadas fisicoquímicamente para saber cuál será su manera de interactuar con la pasta de cemento.

³ Camara Nacional del Cemento

⁴ Chan, J.L., Solís, R. & Moreno, E. (2003) *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. Ingeniería 7-2. 39-46.

⁵ Olague, C. (2003). *Agregados para concreto*. Chihuahua. Textos Universitarios.

CAPÍTULO

1

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN



La Arquitectura mantiene una estrecha relación con la industria de la construcción, de esta manera hoy en día investigadores de diversas ramas con ayuda de la tecnología se han dado a la tarea de realizar investigaciones sobre los materiales con el afán de generar mejores resultados cuando estos son empleados en determinadas obras.

Los problemas del sector de la construcción generalmente se resuelven en el momento y de forma tradicional, debido a esto es necesario realizar un análisis físico, químico y mecánico que aporte información mas precisa y certera de los materiales que empleamos día a día.

Este trabajo plantea el estudio de los materiales que intervienen en la elaboración de mezclas de morteros; arena y cemento. De acuerdo con lo anterior el tema central será el análisis físico y químico del comportamiento mecánico del material.

La investigación retomará los resultados presentados en el trabajo: "Caracterización de cementos tipo portland para su uso en elementos de construcción"⁶ y evaluará 3 tipos de arena, definidos por su uso en el centro y sureste del país.

Como se ha precisado la obtención de datos cuantitativos para la evaluación de los materiales, por lo que se tomará en cuenta los factores ambientales, la procedencia del material, las propiedades y características del cemento y agregado fino, la capacidad del material cementante para interactuar con los granos de arena, la relación agua cemento y la capacidad de carga del mortero.

Las características climáticas y micro-climáticas de un sitio se traducen en las cambiantes condiciones meteorológicas que popularmente se denominan estado del tiempo. Estas

⁶ Salgado, E., Orozco, E. & Muciño, A. (10,2015) *Caracterización de cementos tipo portland para su uso en elementos de construcción*, En 4ª Reunion Nacional de Difractometría. Dirigida por la Sociedad Mexicana de Cristalografía. Acapulco, Guerrero.

condiciones se pueden definir a partir de un conjunto de parámetros que identificaremos como factores ambientales.⁷

Entre los principales parámetros encontramos temperatura, humedad ambiental, radiación solar y el viento. De forma específica a las mezclas de cemento portland le afectan las condiciones de temperatura y humedad, en los climas cálidos y fríos principalmente. Las temperaturas extremas ocasionan un consumo de agua diferente al estandarizado en las normas, lo que podría traducirse en el debilitamiento estructural de las mezclas.

1.1. Los factores ambientales y su influencia en las mezclas de cemento

La temperatura de las mezclas de cemento durante las reacciones químicas de la hidratación tiene un efecto importante en el aumento de la resistencia. Las temperaturas cercanas al punto de congelación del agua retardan el fraguado o endurecimiento hasta ser casi nulos los resultados. Si la temperatura cae por debajo del punto de congelación, el agua libre que se encuentra en la mezcla se convierte en cristales de hielo y, puesto que el hielo tiene mucho mayor volumen que la misma agua en estado líquido, la mezcla se revienta y, al deshelarse, no obtendrá resistencia.⁸

Existen problemas específicos relacionados con la elaboración de las mezclas en clima cálido, derivados del incremento de la temperatura, como, en muchos casos, del incremento en el índice de evaporación de la mezcla fresca.⁹ Si la temperatura se encuentra por encima de 32°C, existe un gran peligro de que el agua se evapore con rapidez, pudiendo reemplazarse sólo con un tiempo de curado mucho mayor para completar la hidratación.

⁷ Despostio de documentos de la FAO sin fecha, recuperado de : <http://www.fao.org/docrep/006/x8234s/x8234s08.htm>

⁸ Quiroz, M. & Salamanca, L. (2006) *Apoyo dicáctico para la enseña y aprendizaje en la asignatura de "tecnología del hormigon"*. Cochabamba, Bolivia.

⁹ Neville, A. M. & Brooks, J.J. (2010) *Concrete Technology*. Londres. Pearson.

Es probable que se tengan grietas en la superficie en un día caliente de verano, porque las reacciones de fraguado se llevan a efecto más rápido y el calor interno debido a la hidratación causa expansión mayor en el interior que en la superficie. Por ello se deben tomar en cuenta las consideraciones pertinentes según el clima en el que se presente la construcción¹⁰:

¹⁰ Zákoutsky, J., Tydlitát, V. & Cérny, R. (2012) *Effect of temperature on the early-stage hydration characteristics of Portland cement: A large-volume calorimetric*. Construction and Building Materials 36. 969-976.

CAPÍTULO

2

EL MORTERO Y SUS COMPONENTES



2.1. El mortero

Es una mezcla plástica aglomerante, es el resultado de mezclar agua y arena con algún cementante como lo son la cal o el cemento.¹¹

El mortero es en sí una mezcla plástica que está constituida por un material conglomerante y un aglomerante, dentro de la matriz conglomerante podemos tener cemento, cal o yeso y en la aglomerante encontramos los agregados pétreos finos. Para que estos se unan se necesita generar una reacción de hidratación en el material cementante; esta se genera por el uso del agua.

Los usos más comunes del mortero van desde el pegado de mampostería hasta los acabados arquitectónicos, según el uso que se le quiera dar será la relación de material cementante con el agregado fino. Es decir, para cada tipo de uso es necesario un diseño de mezcla diferente; para que este pueda cumplir con los requerimientos o condiciones a las cuales será implementado.

2.2. Clasificación del mortero

Según la Norma Mexicana NMX-C-486-ONNCCE-2014 "Mortero para uso estructural"¹², los morteros se pueden clasificar de 3 diferentes formas:

- Por su fabricación
- Por su uso
- Por su resistencia a la compresión

También se puede clasificar el mortero según el material cementante empleado para su fabricación.

¹¹ Ching, F. (2005) *Diccionario visual de arquitectura*. Barcelona. Editorial Gustavo Gili.

¹² NMX-C-486-ONNCCE-2014 *Mortero para uso estructural*. (2014) pp 1-

- Mortero de cal: mezcla de cal, agua y arena. La cal puede ser hidráulica si se necesita que fragüe en el agua o aérea para fraguar al contacto con el aire.
- Mortero de cemento: mezcla de cemento, agua y arena. Dependiendo del uso que se le dé, se le puede adicionar arena fina y mayor o menor cantidad de cemento.
- Mortero de cemento-cal: también puede ser llamado mortero bastardo, ya que intervienen dos materiales cementantes.

Existen otros tipos de mortero según su uso:

- Mortero para asentar mampostería
- Mortero para pegar acabados
- Mortero para revoco grueso
- Mortero para revoco fino
- Mortero impermeabilizante
- Mortero para reparaciones

2.3. Material y agregado del mortero

2.3.1. El cemento portland

Es el principal elemento en la fabricación de morteros, debido a sus propiedades de adhesión y cohesión, lo que le permite aglutinar elementos pétreos para formar otro elemento rígido. Según la Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (ASTM¹³, por sus siglas en inglés) el cemento portland es un cementante hidráulico producido por la pulverización de clinker de cemento portland y, por lo general, contiene sulfato de calcio.¹³

El cemento portland es el nombre dado a un cemento obtenido mezclando íntimamente materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina y óxido de hierro, quemándolos a una temperatura de clinkerización¹⁴ y moliendo el clinker resultante.¹⁵ Es un

¹³ ASTM C 219 - 03 *Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement*. (2003). pp: 1-3.

¹⁴ Teemperatura que va de los 1400°C a los 1550 °C

¹⁵ Neville, A. M. & Brooks, J.J. (2010) *Concrete Technology*. Londres. Pearson.

conglomerante que debido a su capacidad de fraguar y endurecer al reaccionar con agua, este se obtiene mediante la calcinación de la mezcla de arcillas y piedra caliza en un horno rotatorio; posteriormente son pulverizados y finalmente se le adiciona yeso.

2.3.1.1. Producción

El cemento portland se produce por la pulverización del clinker, el cual principalmente se compone de silicatos de calcio hidráulicos, también contiene algunos aluminatos de calcio, ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele juntamente con el clinker para la fabricación del producto final. El material utilizado en la fabricación del cemento portland deben contener las cantidades apropiadas de calcio (CaO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3).¹⁶

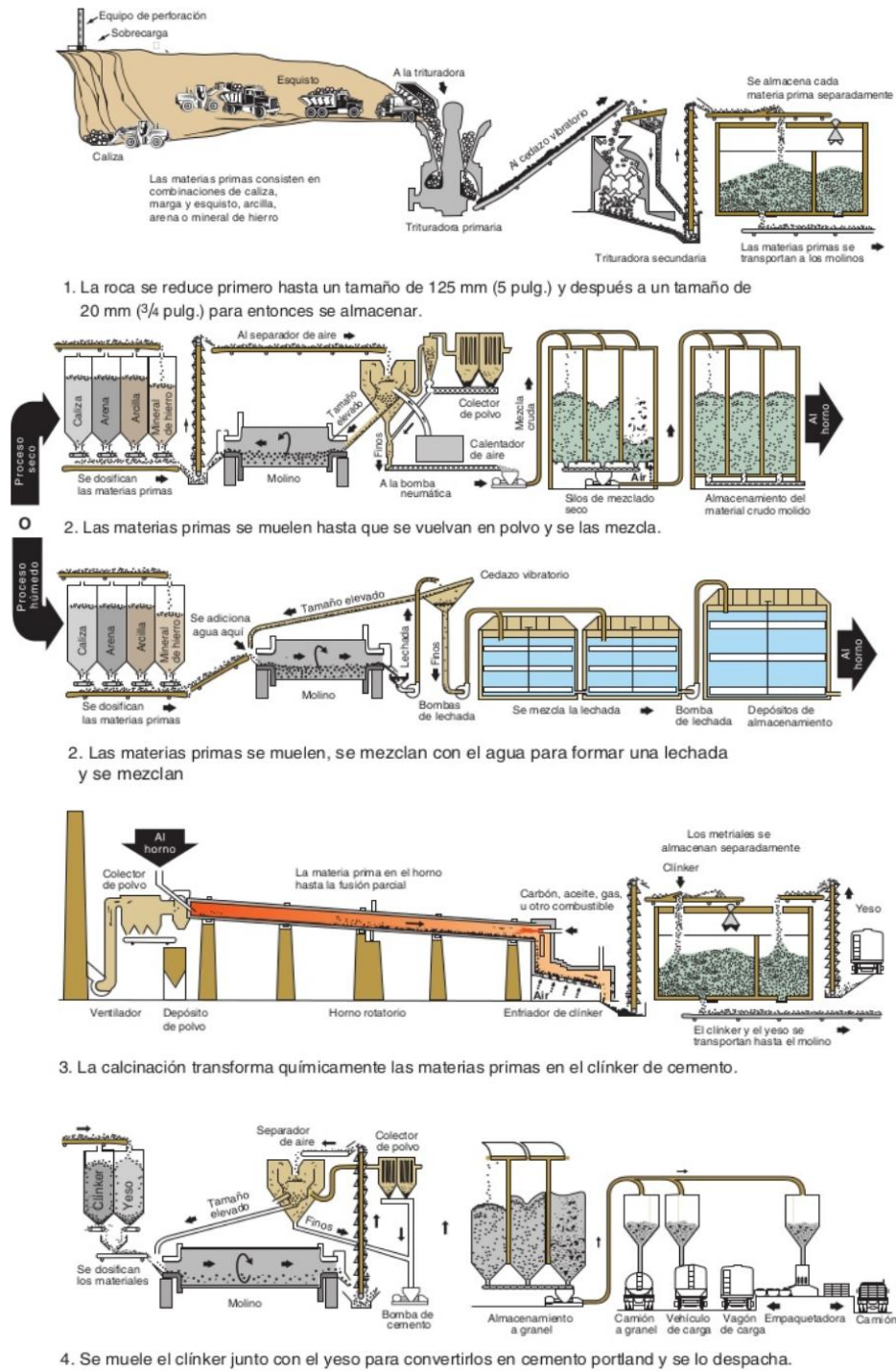
Imagen 1. Piedra caliza cocida previa molienda



Fuente: tomado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Clinker> con fines académicos.

¹⁶ Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, Jussara Tanesi. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Illinois, EE. UU: Portland Cement Association.

Imagen 2. Proceso de producción del Clinker de la materia prima al producto final



Fuente: tomado con fines didácticos del libro *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* del Portland Cement Association

La imagen 2 ilustra el proceso mediante el cual se obtiene el polvo de cemento, desde la extracción de la piedra caliza hasta el depósito y/o ensacado del producto final.

Las materias primas seleccionadas son trituradas y dosificadas de forma tal que el producto resultante tenga la composición necesaria. El cemento se puede fabricar tanto por vía seca como por vía húmeda. En el proceso de vía seca, las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, y en el proceso vía húmeda los materiales se mezclan con agua formando una especie de lechada.

Después del mezclado, la harina cruda se pasa a lo largo del horno en donde el combustible es forzado para generar temperaturas de 1400°C a 1550°C, debido a las altas temperaturas el material crudo sufre un cambio químico y se transforma en el Clinker. Este debe ser enfriado y después es pulverizado, se le adiciona una cantidad de yeso que sirve como controlador del tiempo del fraguado en el cemento, y también para mejorar las propiedades de retracción.

Tabla 3: principales fuentes de extracción de la materia prima utilizada en la producción del cemento portland.

<u>CAL [CaO]</u>	<u>HIERRO [Fe₂O₃]</u>	<u>SILICE [SiO₂]</u>	<u>ALÚMINA [Al₂O₃]</u>	<u>YESO [CaSO₄ · 2H₂O]</u>
Desechos industriales	Polvo de humo de horno de fundición	Silicato de calcio	Mineral de aluminio	Anhidrita
Aregonita	Arcilla	Roca calcarea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita	Mineral de hierro	Arcilla	Roca calcarea	Yeso
Polvo de horno de cemento	Costras de laminado	Ceniza volante	Arcilla	
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Greda	Escoria volante	
Creta	Cenizas de pirita	Caliza	Greda	
Arcilla	Esquisto	Loes	Granodiorita	
Greda		Marga	Caliza	
Caliza		Lavaduras de mineral	Loes	
Mármol		Cuarcita	Lavadura de mineral	
Marga		Ceniza de arroz	Esquisto	
Coquilla		Arena	Escoria volante	
Esquisto		Arenisca	Estauroлита	
Escoria		Esquisto		
		Escoria		
		Basalto		

Fuente: tomado con fines didácticos del libro *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* del Portland Cement Association.

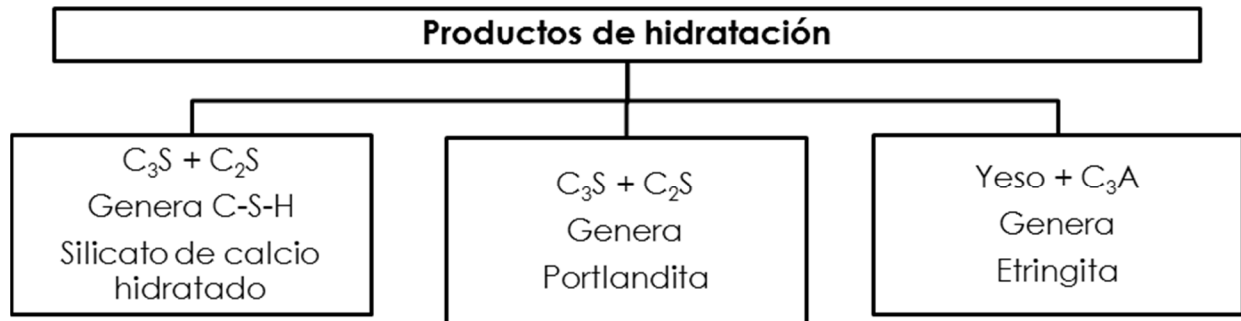
2.3.1.2. Compuestos químicos e hidratación del cemento

Durante el proceso de fabricación del Clinker de cemento portland, justo en el momento de la calcinación, el calcio se combina con otros componentes de la mezcla cruda y forma cuatro de los principales compuestos que corresponden al 90% del volumen de la masa del cemento. En la molienda se añaden sulfato de calcio desde un 4% hasta 6%.

Tabla 4: principales componentes del cemento portland

FASE	SILICATO TRICÁLCICO	SILICATO DICÁLCICO	ALUMINATO TRICÁLCICO	ALUMINOFERRITA TRICÁLCICO	SULFATO DE CALCIO DIHIDRATADO
Nombre mineralógico	Alita	Belita	Celita	Ferrita	Yeso
Composición química	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaO}$	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\cdot\text{F}_2\text{O}_3$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Porcentaje en el polvo del cemento	50 al 70	15 al 30	5 al 10	5 al 15	4 al 6

Los compuestos químicos del cemento en presencia de agua se hidratan y generan nuevos compuestos, con los cuales se estructura la pasta de cemento endurecida en las pastas de cemento, morteros y concreto. La alita (silicato tricálcico) y belita (silicato dicálcico) forman compuestos de hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado, al cual se le deben algunas propiedades del cemento hidratado como lo es la resistencia.



Por su parte el C_3A (aluminato tricálcico) reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar aluminato tetracálcico hidratado, y el C_4AF reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado. La celita, el sulfato de calcio y el agua al combinarse producen trisulfoaluminato de calcio hidratado, conocido como etringita.

Las propiedades de los compuestos químicos del cemento portland son:

- Silicato Tricálcico: se hidrata y se endurece rápidamente, es responsable del inicio del fraguado y la resistencia temprana.
- Silicato Dicálcico: se hidrata y endurece lentamente, contribuye de forma gradual al aumento de la resistencia después de 7 días.
- Aluminato Tricálcico: libera gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento, contribuye en el desarrollo de las resistencias tempranas.
- Ferroaluminato Tetracálcico: es el responsable de la coloración gris del cemento, se produce por el uso de las materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de clinkerización durante la fabricación del cemento.
- Sulfato de Calcio: ofrece el sulfato necesario para la reacción con el C_3A y dar paso a la formación de etringita. Ayuda en gran medida al control del fraguado, el desarrollo de resistencia y el control de la retracción por secado.

Tabla 5: propiedades de los compuestos del cemento

FASE	SILICATO TRICÁLCICO	SILICATO DICÁLCICO	ALUMINATO TRICÁLCICO	ALUMINOFERRITA TRICÁLCICO
Composición química	$3CaO \cdot SiO_2$	$2CaO \cdot SiO_2$	$Al_2O_3 \cdot 3CaO$	$4CaO \cdot Al_2 \cdot F_2O_3$
Hidratación	Rápido (horas)	Lento (días)	Instantáneo	Muy rápido (minutos)
Desarrollo de resistencia	Rápido (días)	lento (semanas)	Muy rápido (1 día)	Muy rápido (1 día)
Calor de hidratación	Medio: 500 J/g*	Bajo: 250 J/g*	Elevado: 850 J/g*	Medio: 420 J/g*
Observaciones	Compuesto mayoritario de los cementos portland		Vulnerable al ataque por sulfatos	Genera la coloración gris del cemento

Fuente: tomado y traducido al español con fines académicos del libro *Concrete in hot environments*, I. Soroka, Chapman & Hall

* GigaJoules

2.3.1.3. Tipos de cemento portland

Existen diversos requerimientos para el cemento cuando de diseño de mezclas se trata. La norma ASTM C150 "Especificación normalizada para cemento portland"¹⁷ establece ocho tipos de concreto:

- Tipo I Normal
- Tipo IA Normal con aire incluido
- Tipo II Moderada resistencia a los sulfatos
- Tipo IIA Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
- Tipo III Alta resistencia inicial
- Tipo IIIA Alta resistencia inicial con aire incluido
- Tipo IV Bajo calor de hidratación
- Tipo V Alta resistencia a los sulfatos

El cemento tipo I es el de uso normal, se usa para la construcción de una banqueta, de una casa, un concreto simple o reforzado. El tipo II es el requerido donde el diseño de mezclas establece que el cemento tenga resistencia moderada al ataque por sulfatos, desde una estructura simple a orillas del mar, o en una estructura que estará en contacto directo en zonas de alto contenido de sulfatos como lo pueden ser los mantos freáticos que existen al interior de la tierra. Este tipo de cemento tiene cierta resistencia a los sulfatos debido a que contiene un 8% máximo de C_3A (aluminato tricálcico).

Tipo III, este cemento debe presentar resistencia a la compresión a edades tempranas; normalmente en un lapso de 7 días. Para lograr una resistencia temprana el polvo de cemento necesita ser molido más finamente que el polvo de cemento para el tipo I. Por el contrario, el cemento tipo IV es el que genera bajo calor de hidratación por lo que gana resistencia mucho más despacio que el cemento normal, este tipo de cemento solo se encuentra en el mercado bajo pedidos especiales.

Cemento tipo V, con alta resistencia a los sulfatos, como su nombre indica este tipo de cemento son los utilizados cuando la obra va a estar en contacto directo con los sulfatos. Es muy importante que el contenido de C_3A no exceda el 5% de la mezcla del polvo, adicionalmente se necesita que la mezcla

¹⁷ ASTM C 150 - 07 *Standard Specification for Portland Cement* (2007) pp: 1 - 8

de cemento no tenga una alta relación agua-material cementante y evitar que sea porosa. Este y todos los tipos de cemento no son resistentes a los ácidos o sustancias corrosivas.

Cementos con aire incluido, este tipo de cemento al igual que el tipo IV no es tan fácil de conseguir en el mercado ya que muchas veces el concreto con aire incluido utiliza algún tipo de aditivo a diferencia del cemento que durante el proceso de molienda se le agrega un inclusor de aire.

La norma ASTM C1157 "Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento Hidráulico"¹⁸, presenta seis tipos de cementantes hidráulicos:

- Tipo GU - uso general
- Tipo HE - alta resistencia inicial
- Tipo MS - moderada resistencia a los sulfatos
- Tipo HS - alta resistencia a los sulfatos
- Tipo MH - moderado calor de hidratación
- Tipo LH - bajo calor de hidratación

Esta norma permite una clasificación más y es la R, que significa baja reactividad con agregados álcali reactivo, para ayudar en el control de la reactividad álcali-agregado.¹⁹ En México los cementos se clasifican según la norma NMX-C-414-ONNCCE "Industria de la construcción-Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba" y establece seis tipos básicos de cemento como se describe en la tabla 6.

Los cementos pueden tener alguna característica especial como lo son:

- RS: resistente a sulfatos
- BRA: baja reactividad álcali-agregado
- BCH: bajo calor de hidratación
- B: blanco

¹⁸ ASTM C 1157 - 11 *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement* (2011) pp: 1-5

¹⁹ P. Termkhajornkit, R. Barbarulo y C. Chanvillard, «Microstructurally-designed cement pastes: A mimic strategy to determine the relationships between microstructure and properties at any hydration degree,» *Cement & Concrete Research*, pp. 66-77, 2015.

Tabla 6. Tipos de Cemento en México

TIPO		CARACTERÍSTICAS
CPO	Cemento Portland Ordinario	Puede contener hasta un 5% de adiciones como puzolanas, escoria, humo de sílice y caliza
CPP	Cemento Portland Puzolánico	Contiene del 6% al 50% de puzolana en el total del volumen del cemento
CPEG	Cemento Portland con Escoria de alto horno	Contiene del 6% al 60% de escoria
CPC	Cemento Portland Compuesto	Contiene Clinker, Yeso y dos o más adiciones
CPS	Cemento Portland con humo de Sílice	Contiene del 1% al 10% de humo de sílice
CEG	Cemento con Escoria de alto horno	Contiene del 61% al 80% de escoria

Fuente: elaboración basada en la norma NMX-C-414-ONNCCE

2.3.2. Agregados pétreos

El 100% de las mezclas de cemento portland que se elaboran en México ocupan para su fabricación agregados que pueden ser obtenidos de dos fuentes: en depósitos de origen natural (ríos, playas, etc.) y como productos de trituración de roca.²⁰ Estos materiales son uno de los constituyentes de la mezcla de un mortero, representan el 73% del volumen en seco.

Una roca es el agregado natural que se forma por la asociación química de uno o más minerales en conjunto con cierta cantidad de impurezas. Los minerales que forman las rocas son los que se encuentran en la corteza terrestre lo que genera que estas puedan ser débiles y de fácil deformación o bien, que sean duras, fuertes y resistentes.

²⁰ Hoshino, S., Yamada, S. & Hirao, H. *XRD/Rietveld Analysis of the Hydration and Strength Development of Slag and Limestone Blended Cement*. (2006) *Journal of Advance Concrete Tecnology*, pp. 357-367.

Según la norma ASTM C 294 "Nomenclatura descriptiva estándar para constituyentes de agregados minerales naturales"²¹ las rocas se clasifican en:

- Rocas Eruptivas o Ígneas
- Rocas Sedimentarias
- Rocas Metamórfica

Las rocas ígneas son aquellas que se ha producido a consecuencia del enfriamiento del magma o masas fundidas. Estas a su vez se dividen en intrusivas y efusivas, las intrusivas son aquellas que se enfrían en el interior de la corteza terrestre y posteriormente salen, las efusivas son las que se enfrían en el exterior de la corteza.

Sedimentarias, este tipo de roca se produce por la formación y sedimentación de material mineral, por la compactación vegetal o animal sobre rocas duras. La mineralogía de este tipo de piedras es muy sencilla, sus componentes son muy estables y poco alterables; presentan una estructura cristalina. Un ejemplo de este tipo de roca es la arenisca.

Las rocas metamórficas son el resultado de la transformación de las rocas existentes mediante cambios estructurales y mineralógicos bajo ciertas condiciones químicas y físicas. Un claro ejemplo de este tipo de roca es la pizarra, formada por la compactación por metamorfismo de bajo grado de lutitas.

Las rocas se encuentran en un constante cambio, de manera lenta; lo que puede hacer que un determinado tipo de roca se transforme en otra. Los elementos químicos en las rocas se pueden presentar en dos formas: cristalizado o amorfos. Los elementos cristalizados muestran formas cristalinas propias, limitadas por caras planas, con cambios de estado a una determinada temperatura, los amorfos muestran una estructura molecular desorganizada y ante los cambios térmicos, modifican su estado de forma paulatina.

²¹ ASTM C 294-12 *Standar descriptiva Nomenclature for Constituents of Concrete Agregates.* (2012) pp 1-10

Tabla 7. Familia de rocas

TIPO DE ROCA Y ORIGEN	NOMBRE	COMPONENTES MINERALOGICOS	OBSERVACIONES USO CONSTRUCCIÓN	
I G N E A S	PLUTONICAS	GRANITO	CUARZO, FELDESPATOS, MICAS Y PLAGIOCLASE	FACILMENTE INTEMPERISABLE EN CLIMA TROPICAL
		DIORITA	PLAGIOCLASE Y MICA	
		GABRO	PLAGIOCLASE Y MICA	ALTO PESO ESPECIFICO
	VOLCÁNICA PIROCLÁSICAS	RIOLITA	CUARZO, FELDESPATOS, MICAS, VIDRIO Y PLAGIOCLASE	ALTAMENTE REACTIVA CON LOS ALCALIS DEL CEMENTO
		ANDESITA	PLAGIOCLASE, MICA Y VIDRIO	
		BASALTO	PI, V Y M	ALTA RESITENCIA A LA COMPRESIÓN, POROSA Y RESITENTE A LA ABRASIÓN
		TOBAS	VARIABLE	PUDEN SER REACTIVAS Y/O MUY DELEZNABLES
S E D I M E N T A R I A S	CLÁSTICAS	CONGLOMERADO	FRAGMENTO DE ROCA Y MATRIZ	
		ARENISCA	Qz, Pk, PI Y FRAGMENTOS DE ROCA	PUEDE CONTENER EMENTANTE SÍLICO QUE ES REACTIVO CON LOS ÁLCALIS DEL CEMENTO
		LUTITA	MATERIALES ARCILLOSOS	PRESENTA FÍSIBILIDAD, BAJA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y PUEDE HIDRATARSE A TRAVÉS DEL MATERIAL ARCILLOSO
	NO CLÁSTICAS	CALIZA	CALCITA	ALTAMENTE SOLUBLE
		MARGA	CALCITA Y MINERALES ARCILLOSOS	FACIL HIDRATACIÓN
		DOLOMITA	CALCITA Y DOLOMITA	SE PUEDE PROVOCAR REACCIÓN ÁLCALI-CARBONATO A TRÁVES DE LA DESDOLOMITACIÓN
		YESO	ANHIDRITA	MUY LIGERO, BAJA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN
CARBÓN	CARBÓN	LIGERO, DELEZNABLE Y/O FRÁGIL. GENERA PROBLEMAS DURENTE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO		
M E T A M Ó R F I C A S	FOLIADAS	PIZARRA	Qz, MICAS, CLORITA Y SERECITA	DELEZNABLE
		ESQUISTO	MICAS, Fk, Cloritas, QZ, CALCITA Y FELDESPATOS	PUEDE SER MUY DELEZNABLE
		GNEISS	FERROMAGNESIANOS	
	NO FOLIADAS	HORNFELDS	MICA, GRANATE, Px CUARZO, FELDESPATOS	PUEDE CONTENER SÍLICE DEL TIPO REACTIVO CON LOS ÁLCALIS DEL CEMENTO
		CUARCITA	Qz, FELDESPATOS SILLIMANITA	
		MÁRMOL	CALCITA, Px Y AN	DEMORNFLES

Fuente: retomado de Chan, J. et al. *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto.*

La norma ASTM C 294 “Nomenclatura descriptiva estándar para constituyentes de agregados minerales naturales”²², describe los minerales más comunes que se encuentran en los agregados como lo son:

- Minerales de sílice
- Feldespatos
- Minerales micáceos
- Minerales de sulfuro de hierro
- Minerales de carbonato
- Zeolitas
- Mininera
- Minerales de arcilla
- Minerales de óxido de hierro
- Minerales de ferromagnesio

En la construcción se utilizan las rocas para crear elementos resistentes, elementos decorativos o como materia prima para la elaboración de otros materiales como lo son los morteros o concretos. Para poder ser utilizadas están deben de cumplir con las siguientes características:

- Homogénea
- Sin grietas o cavidades
- Que no esté alterada
- Que no sufra alteraciones con los agentes atmosféricos
- Que no se congele y/o intemperice

Los agregados que se utilizan en las mezclas de cemento son denominados comúnmente áridos, y estos provienen de una roca que después de un proceso de clasificación por granulometría se ocupan en la producción de morteros, concretos y aglomerantes. El tamaño de los áridos es muy variable pues va desde las 60 micras hasta varios metros.

²² ASTM C 294-12 *Standar descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Agregates*. (2012) pp 1-10

Los áridos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Naturales: aquellos que proceden de yacimientos minerales, son extraídos por medios mecánicos y se pueden dividir en: granulares o rodados, solo pueden ser utilizados después de que han sido lavados y los áridos de machaqueo, aquellos que se producen en canteras donde son sometidos a un proceso de trituración y clasificación, su origen casi siempre es calizo.
- Artificiales: constituidos por subproductos industriales como la escoria de la industria siderúrgica.
- Ligeros: pueden ser naturales o artificiales mientras su densidad aparente este por debajo de los 1000 kg/m^3 .
- Reciclados: procedente de demoliciones, representan una fuente de materia prima para los áridos de machaqueo.

Desde el punto de vista del tamaño, los agregados se dividen en dos grupos; los agregados gruesos y los agregados finos: los primeros son aquellos cuyas partículas son mayores a 5 mm y hasta 125 mm; los segundos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van de los 5 mm a los $60 \mu\text{m}$.²³ Estas a su vez se puede clasificar de la siguiente manera:

- Arenas gruesas: comprendidas entre 2 y 5 mm
- Arenas medias: comprendidas entre 0.5 y 2 mm
- Arenas finas: comprendidas entre 0.08 y 0.5 mm
- Finos de arena: es la cantidad inferior a 0.08 mm

La arena es el agregado con mayor responsabilidad e influencia en todas las propiedades exigibles a las mezclas de cemento portland. Las mejores arenas son las de río por su alto contenido de sílice; lo que ayuda a la resistencia mecánica y durabilidad. La arena de mar puede utilizarse siempre que acuse a un previo lavado con agua dulce.

²³ Neville, A. M. & Brooks, J.J. (2010) *Concrete Technology*. Londres. Pearson.

Las que provienen de machaqueo de granitos, basaltos y rocas análogas son también excelentes siempre y cuando no sufran un principio de descomposición. Las arenas de procedencia caliza son de calidad muy variable.²⁴ Resultan más absorbentes y requieren mayor cantidad de agua de amasado que las silíceas.

Al igual que los materiales cementantes los áridos deben reunir algunas cualidades y propiedades físicas como²⁵:

- **Densidad de masa:** característica que se utiliza, en primer lugar, para realizar una clasificación de los áridos, en ligeros con una densidad menor de 2400 kg/m³, normales con densidad entre 2400 y 2800 kg/m³ y pesados con densidad superior a 2800 kg/m.
- **Porosidad y absorción:** tiene una gran influencia en su adherencia con la pasta de cemento y, por tanto, en las resistencias mecánicas. Igualmente, influye en el comportamiento de los áridos frente a los ciclos hielo-deshielo y en definitiva en su durabilidad.
- **Humedad:** conocer la humedad que poseen los áridos, especialmente las arenas, es muy importante por la gran repercusión que puede tener, en la relación (Agua/Cemento) real que se está empleando.
- **Entumecimiento:** es el incremento de volumen que experimentan estas cuando se humedecen. Al aumentar la cantidad de agua contenida en una arena hasta un determinado límite, el volumen de conjunto de la misma crece como consecuencia de la película de agua que envuelve a cada uno de los granos.
- **Forma y textura superficial:** Las características externas del árido, en particular la forma y la textura superficial de las partículas, inciden en las propiedades de la mezcla en estado fresco y endurecido, como pueden ser, entre otras, la docilidad y las resistencias mecánicas, respectivamente.

²⁴ Chan, J.L., Solís, R. & Moreno, E. (2003) *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. Ingeniería 7-2. 39-46.

²⁵ Neville, A. M. & Brooks, J.J. (2010) *Concrete Technology*. Londres. Pearson.

- Adherencia del árido a la pasta de cemento: una textura áspera y/o la mayor superficie de un árido anguloso dan lugar a una mayor adherencia entre el árido y la pasta de cemento. En general, texturas superficiales que impidan la penetración de la pasta de cemento por la superficie de las partículas de árido no producen una buena adherencia.

2.3.3. Agua

El agua es un ingrediente clave de las pastas, morteros y concretos, pues las fases del cemento portland tienen que reaccionar químicamente con el agua para desarrollar resistencia. La cantidad de agua adicionada a la mezcla también controla la durabilidad, es un elemento de especial cuidado debido al papel importante que desempeña como agua de mezclado y agua de curado.²⁶

El agua de mezclado cumple con dos funciones vitales, la primera es la hidratación del cemento y la segunda es la de proporcionar a la mezcla la trabajabilidad necesaria. La cantidad de agua de mezclado es limitada al mínimo estrictamente necesario para conferirle a la pasta la trabajabilidad requerida, ya que el agua en exceso se evapora y genera poros capilares que disminuyen la resistencia.

El agua de curado es muy importante en la etapa del fraguado y el primer endurecimiento. Su principal objetivo es evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento y evitar la retracción prematura. Esta tiene una actuación más larga y duradera que el agua de mezclado, y por ellos se corre más riesgo si no se controla la calidad del agua.

A medida que la relación agua-cemento aumenta, la porosidad aumenta y la resistencia disminuye.²⁷ El agua en los materiales cementantes se encuentra en muchas formas:

- Agua libre es el agua de la mezcla que no reaccionó con las fases del cemento.

²⁶ Neville, A. M. & Brooks, J.J. (2010) *Concrete Technology*. Londres. Pearson

²⁷ Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, Jussara Tanesi. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Illinois, EE. UU: Portland Cement Association.

- Agua retenida es la químicamente combinada en las fases sólidas o físicamente adherida a las superficies del sólido.

Para la completa hidratación del cemento portland, sólo aproximadamente 40% de agua es necesaria. Si la relación agua-cemento es mayor que 0.40, el exceso del agua que no se utiliza para la hidratación permanece en los poros capilares o se evapora. Si la relación agua-cemento es menor que 0.40, parte del cemento va a permanecer anhidro.

2.3.3.1. Calidad del agua

El agua para mezclado y curado resulta satisfactoria si es potable, es decir que es apta para consumo humano. Esta debe ser razonablemente limpia, sin cantidades dañinas de materia orgánica, fango o sales, el límite máximo de turbidez es de 2000 ppm. En México la norma NMX-C-122-1982 “Agua para concreto” establece los límites de impurezas que son tolerables en el agua de mezclado para la elaboración de mezclas.

Tabla 8. Límites de impurezas en el agua de mezclado.

IMPUREZAS	TIPOS DE CEMENTO	
	CEMENTO RICO EN CALCIO	CEMENTO RESISTENTE A LOS SULFATOS
Solidos en suspension en aguas naturales (limos y arcillas), máximo	2000	2000
Solidos en suspension en aguas recicladas, (finos de cementsot y agregados), máximo	50000	35000
Cloruros como Cl para concreto con acero de presfuerzo y piezas puentes, máximo	400	600
Cloruros como Cl para concretos reforzados que estén en ambiente húmedo o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares, máximo	700	1000
Sulfatos como SO ₄ , máximo	3000	3500
Magnesio como Mg ⁺⁺ , máximo	100	150
Carbonatos como CO ₃ , máximo	600	600
Bioxido de carbono disuelto como CO ₂ , máximo	5	3
Álcalis totales como Na ⁺ , máximo	300	450
Total de impurezas en solución, máximo	3500	4000
Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica (oxigeno consumido en medio ácido), máximo	150	150
Potencial de hidrógeno (pH), mínimo	6	6.5

Fuente: tomado de la Norma Mexicana NMX-C-122-1982

Si el agua de mezclado presenta impurezas excesivamente es muy probable que el tiempo de fraguado, así como la resistencia y la estabilidad del volumen de la mezcla se vea afectado. Una patología que se presenta a temprana edad es la eflorescencia, como consecuencia del uso de un agua contaminada.

2.4. Influencia de los agregados finos en las características del mortero.

El mortero al ser un material compuesto se encuentra inmerso en una gran variabilidad de sus componentes, tanto física como químicamente. Los efectos de esta variabilidad se pueden observar tanto en estado fresco como endurecido de la mezcla. Las arenas al ser un agregado pétreo se convierten en un componente dinámico dentro del mortero; y al formar la mayor parte del volumen deben considerarse de manera crítica.

En los agregados finos se debe tener particular cuidado en la granulometría, dentro de este parámetro podemos encontrar el módulo de finura y la continuidad en los tamaños de partícula. Si la arena es gruesa produce una mezcla con poca trabajabilidad y falta de cohesión. Por el contrario, si la arena es muy fina la composición podría ser demasiado fluida, lo que se traduce en un aumento de la cantidad de cemento para cumplir la resistencia requerida y se corre el riesgo de que ocurran agrietamientos superficiales por contracción durante el secado.²⁸

El grado de absorción del agregado fino influye directamente en la relación a/c_{iii} en la zona de transición y la resistencia del material. Dependiendo de la capacidad de absorción del material será el grado de alteración que se puede sufrir; la cantidad de espacios vacíos como los poros, fisuras y permeabilidad son algunos de los factores que influyen en la resistencia de cualquier mezcla de

²⁸ Uribe. R., *El control de calidad en los agregados para concreto 3ª parte.* (1991) Construcción y Tecnología. (México)

cemento portland. Estas afecciones generalmente comienzan en la zona de interfase entre el grano de arena y la cantidad de pasta de cemento que lo rodea.

En las arenas la zona de interfase es pequeña, pero la suma de estas genera un volumen considerable, cerca de una tercera parte de la pasta de cemento. A nivel microestructural esta zona es muy importante, puesto que se debe tomar en cuenta que la pasta de cemento tiene una mayor porosidad en la zona de interfase para poderse unir con las partículas del agregado, a diferencia de la parte más alejada de dichas partículas donde habrá una gran cantidad de cemento endurecido.

Diferentes arenas producirán diferentes mezclas de mortero, cada una con diferentes requerimientos de agua y cantidades de cemento según sea requerido el material. Las arenas provenientes de piedra caliza generalmente son de características y calidades muy variables; a diferencia de las que provienen de rocas ígneas. Los agregados calizos tienen una mayor porosidad que se traduce en un mayor consumo de agua, pueden ser muy frágiles o muy resistentes según las características de formación del material parental.²⁹

Organismos a nivel internacional y nacional recomiendan el uso de arenas provenientes de río, piedra tritura o dolomita debido a su alto contenido de sílice, lo que las convierte en productos subvalorados en lo que a resistencia mecánica se refiere. Siempre se debe buscar que el agregado ayude a una estabilidad volumétrica de la mezcla, ayudando así a genera una composición en la que se optimice el consumo del cemento y la demanda de agua.

²⁹ Centero, R., Duarte, F., & Castillo, W. *Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida*. (1996) Boletín Académico FIUADY. (México)

CAPÍTULO

3

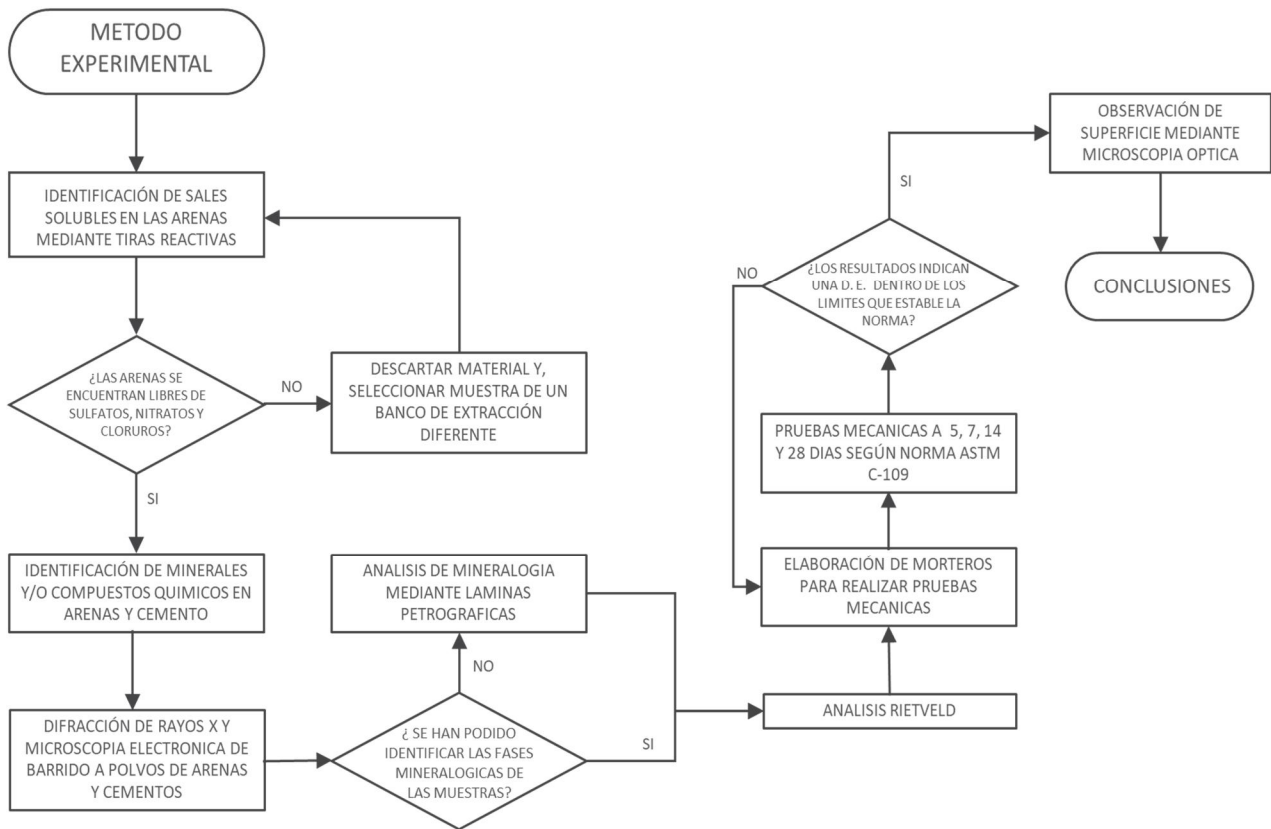
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL



3.1. Método experimental

A continuación se describe el procedimiento experimental empleado para la realización de la investigación; a partir de los resultados reportados en el trabajo titulado *Caracterización de cementos tipo portland para su uso en elementos de construcción*³⁰, se extraen las conclusiones que arroja la investigación hecha en cementos y a partir de ahí se realizan pruebas mecánicas y la caracterización de la microestructura y composición de los materiales que componen el mortero. Para esto se emplean técnicas de Difracción de Rayos X, Microscopía óptica, Microscopía Electrónica de Barrido, Identificación de fases e identificación de sales solubles. El diagrama 1 describe el procedimiento establecido para la caracterización del mortero.

Diagrama 1. Procedimiento experimental empleado.



Fuente. Elaboración propia.

³⁰ Salgado, E., Orozco, E. & Muciño, A. (10,2015) *Caracterización de cementos tipo portland para su uso en elementos de construcción*, En 4ª Reunión Nacional de Difractometría. Dirigida por la Sociedad Mexicana de Cristalografía. Acapulco, Guerrero

3.2. Materiales empleados

3.2.1. Agregado fino (arena de construcción)

En esta etapa se evaluaron 3 tipos de arena empleadas para la construcción en nuestro país, con el fin de establecer una comparativa entre el material de mayor uso en la península de Yucatán y el centro del país. El polvo de piedra, utilizado en el sureste; es material producto de la trituración de piedra caliza, libre de contaminación, cribada con granulometría de 1/8" a 0". En el centro del país se cuenta con arena rosa y gris, estas son material extraído de minas de arena para la construcción.

3.2.2. Cemento

De igual manera se decidió establecer análisis en 3 diferentes marcas de cemento de las 5 que se producen en la República Mexicana según lo reportado por Salgado, E., Orozco, E. & Muciño, A., del cual se eligen aquellos que tienen mejor comportamiento mecánico; el primer cemento elegido es Tipo I Compuesto (CPC 30R RS), cumple con las especificaciones de la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCE "Industria de la construcción-Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba" y la norteamericana ASTM C-1157 "Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento Hidráulico". Esta marca es la más consumida en el centro del país, pasando por autoconstrucción hasta grandes obras de infraestructura.

Se eligió una segunda marca del centro del país, con su cemento Tipo I CPC 30R para tener una comparativa lo más exacta posible entre los principales productores de cemento en el país. La última marca analizada es Tipo I CPC 30R Extra, este es el cemento de mayor consumo en el sureste del país (Campeche, Yucatán y Quintana Roo). Ambas marcas cumplen con la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCE "Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba".

3.2.3. Agua

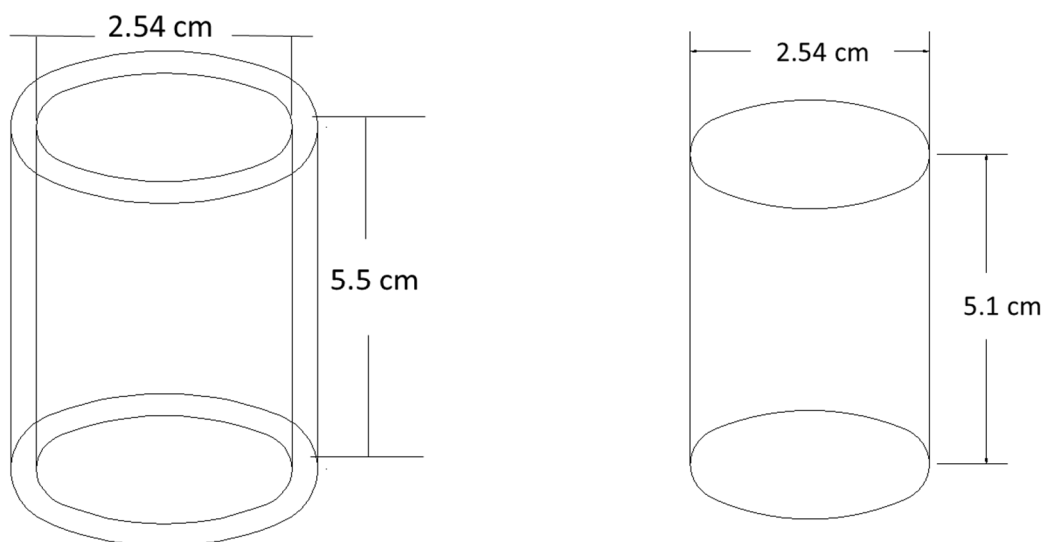
El agua empleada para la elaboración de las mezclas fue agua potable de la red que ingresa a la Ciudad de México, cumpliendo con la normatividad correspondiente en cuanto a la pureza

requerida para su consumo según la norma agua potable es la que puede ser consumida por el ser humano gracias a que se le realiza un proceso de purificación mediante el cual se le eliminan bacterias, virus, minerales, productos tóxicos, partículas en suspensión, sustancias orgánicas y radiactividad. Para su implementación en mezclas que contengan cemento es primordial la pureza de este líquido ya que las reacciones de hidratación generadas en las distintas mezclas dependen de la pureza de este vital líquido.

3.2.4. Elaboración de muestras.

Para la realización de las pruebas mecánicas se implementaron probetas que se colaron en moldes cilíndricos de 2.5 cm de radio y 5.3 cm de alto, realizados con tubos de acrílico. Se adaptó la norma ASTM C-109³¹ debido a que la cantidad de muestras que se requieren para evaluar esta parte experimental. Los moldes cilíndricos fueron colocados sobre una superficie no absorbente posteriormente fueron desmoldados 24 horas después de ser coladas y se rectificaron para obtener caras paralelas. Se le tomaron medidas de base y altura para poder realizar los cálculos de esfuerzo y desplazamiento.

Imagen 3. Esquema con medidas para la fabricación de moldes y probetas para someter a pruebas mecánicas



³¹ ASTM C 109 - Método de resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico",

3.2.5. Mezcla empleada para la evaluación de morteros

Para la evaluación de la resistencia a la compresión de los diferentes tipos de arena empleadas para la construcción en la República Mexicana se realizó el diseño de mezcla con base en la norma ASTM C-109 "Método de resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico", usando los moldes que se obtuvieron del apartado "Elaboración de muestras". Para el objetivo de investigación se realizaron moldes cilíndricos con dimensiones menores, respetando las condiciones en las cuales debe elaborarse las mezclas ya que la norma establece la relación 1:2.75 en peso de cemento y arena estándar graduada para un mortero estándar, así mismo especifica una relación agua - cemento de 0.485 para todos los tipos de cemento portland.

Con base en los datos anteriores y aplicando una regla de tres obtenemos que para una probeta de 2.5 cm de radio y 5 cm de alto (24.54 cm^3) serán necesarios 16.36 gr de cemento, 43.99 gramos de arena y 7.92 ml de agua, estos datos serán multiplicados por el número de probetas a colar. Para obtener la desviación estándar la norma establece como necesario ensayar 3 probetas como mínimo, por esta razón y como método preventivo se colarán 5 probetas para cada día de prueba; lo que se traduce en 20 probetas por cada tipo de arena con cada marca de cemento. Los días de prueba fueron 5, 7, 14 y 28 como lo establece la norma ASTM para morteros de cemento hidráulico.



Imagen 4. Elaboración de probetas realizadas con cemento C₁ para pruebas mecánicas.

3.3. Técnicas de caracterización

3.3.1. Identificación de sales solubles

Para la implementación de esta prueba, se realizaron disoluciones con los diferentes tipos de arena utilizadas en las pruebas mecánicas. Se tomaron 5 gramos de arena y 50 ml de agua desionizada, se agitaron y dejaron decantar durante 2 minutos. Después se tomó una muestra del agua y se colocó en tubos de ensayos para poder utilizar las tiras reactivas marca Quantofix que tienen un colorante que cambia de color en presencia de los iones, que identificarían la presencia de nitratos, sulfatos y cloruros. Ver imagen 5.

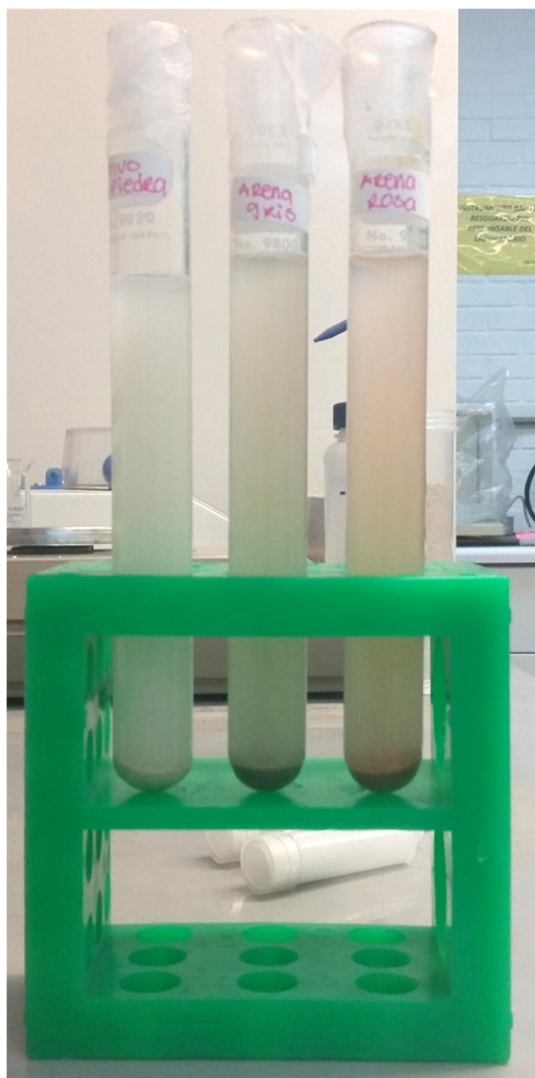


Imagen 5. Soluciones implementadas para las identificaciones de sales solubles.

3.3.2. Microscopia Óptica

Esta técnica nos permite observar y obtener información acerca de la morfología, textura, color de las arenas y polvos de cementos que se emplearon en la elaboración de los morteros. La observación de superficie permite visualizar elementos que a simple vista son difíciles de ver en detalle, utiliza lentes para la observación de elementos aumentados. Se ilumina con luz visible y las muestras se pueden colocar en polvos, húmedas, películas, sólidos, etc.; siempre que estas puedan ser de superficie plana para permitir el enfoque.

Para el caso de estudio de las arenas y polvos de cemento empleados en la elaboración de los morteros estos fueron colocados en porta objetos de acrílico para su observación. Los morteros ensayados en las pruebas mecánicas se montaron en resina acrílica, se pulieron tipo espejo y se cortaron en láminas con un grosor menor a 5 mm para facilitar el enfoque de la superficie y tener mejor identificación visual de la interacción de la pasta de cemento con los granos del agregado.

Este estudio se realizó con un microscopio estereoscópico marca Olympus modelo SZX16 del laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales del Instituto de Física de la UNAM.

La petrografía es la rama de la geología que se encarga de la descripción mineralógica detallada de las rocas, naturales o artificiales. El análisis se lleva a cabo en un microscopio óptico de luz visible con filtro polarizador, este revela la forma de los cristales que componen la roca; lo que permite obtener datos evaluables en cuanto a composición mineralógica y microestructura se refiere.

El estudio fue realizado únicamente a las arenas, para esto se prepararon en láminas delgadas que fueron observadas en un microscopio estereoscopio con filtro polarizador marca ZEISS modelo Primo Tech del Laboratorio CODICE de la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural INAH. (Ver imagen 6)



Imagen 6. Implementación del Microscopio estereoscópico con filtro polarizador marca ZEISS modelo Primo Tech para llevar a cabo el estudio petrográfico.

3.3.3. Microscopia Electrónica de Barrido

Permite la observación y caracterización superficial de materiales inorgánicos y orgánicos, por medio de la interacción de un haz de electrones en una zona de la superficie que se quiere estudiar, esta zona es barrida con el haz por lo cual se genera la aparición de diferentes señales que necesitan ser captadas con el detector adecuado. Con él se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas y su caracterización elemental mediante el análisis dispersivo de rayos X (EDS)

Las muestras de los polvos de cemento se montaron con cinta de carbono en barriles de cobre de 9mm de diámetro y 10 mm de alto. Las arenas se colocaron sobre porta muestras de aluminio de 25 mm de diámetro y se mandaron a recubrir con oro para una mejor observación puesto que permite el flujo mas rápido de los electrones. Las imágenes y caracterizaciones elementales de las muestras fueron tomadas con un microscopio de alta resolución JSM - 7800 F, en el Laboratorio Central de Microscopia del Instituto de Física de la UNAM.



Imagen7. Microscopio Electrónico de Barrido JSM – 7800 F, Laboratorio Central de Microscopia del Instituto de Física de la UNAM.

3.3.4. Difracción de Rayos X (DRX)

Método basado en la interacción entre los rayos X y la materia cristalina que produce la difracción, de forma tal que cuando la radiación incide sobre una estructura cristalina se produce la difracción del haz cuando se cumple la ley de Bragg ($n\lambda = 2d \sin \Theta$) y manteniendo la λ de la radiación incidente y n constantes se pueden determinar variaciones en el espacio entre planos reticulares o el ángulo de difracción. La muestra es irradiada con rayos X de una determinada longitud de onda, la muestra y el detector girarán simultáneamente cambiando el ángulo; a medida que este se ajusta a la ley de Bragg se produce la difracción.

Las muestras en polvo de los cementos y arenas se colocaron en tubos de eppendorf de polipropileno con una capacidad de 2 ml previamente desinfectados con la intención de mantener la mayor pureza posible del material. Posteriormente se colocaron en la porta muestra al interior del equipo y se realizó la prueba. El equipo empleado fue un Difractómetro de la marca BRUKER, modelo D-8 Discover en el Laboratorio de Refinamiento de Estructuras Cristalinas del Instituto de Física de la UNAM.



Imagen 8. Difractómetro modelo D-8 Discover BRUKER del Laboratorio de Refinamiento de Estructuras Cristalinas del Instituto de Física de la UNAM.

3.3.5. Identificación de fases y análisis Rietveld

La identificación de fases sirve para distinguir los compuestos mayores y menores presentes en la muestra difractada. Dicha identificación se realizó con la base del ICDD (Centro Internacional de Datos de Difracción, por sus siglas en inglés), de donde se obtuvieron los datos necesarios que se complementaron con la microscopía electrónica de barrido y la examinación de las laminas petrográficas.

El método de Rietveld es un análisis cuantitativo mineralógico, consiste en ajustar teóricamente los parámetros de red, deslizamientos atómicos, anisotropía, etc., así como experimentales, que dependen de las condiciones de experimentación.³² La identificación de fases se realizó con la base del ICDD (Centro Internacional de Datos de Difracción, por sus siglas en inglés), de donde se obtuvieron los datos necesarios para poder realizar el análisis Rietveld con los programas GSAS y EXPGUI.

3.3.6. Pruebas mecánicas

Consiste en pruebas físicas que tiene como objetivo determinar la resistencia o deformación del material ante un esfuerzo a compresión. Para llevarla a cabo es necesario contar con una máquina de pruebas universales. Según la norma ASTM C-109 "Método de resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico", las edades para la realización de la prueba son 1, 3, 7 y 28 días.

La resistencia a la compresión se calcula utilizando la formula $E=P/A$, donde P es la carga axial máxima aplicada a la probeta, expresada en KN y A es el área de contacto medida en mm^2 . La prueba se realizó mediante la máquina de pruebas universales SHIMADZU modelo AG-100KNG que pertenece al Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales del Instituto de Física de la UNAM.

³² Petrick C. S., & Castillo B. R. (2004) *Método de Rietveld para el estudio de estructuras cristalinas*. Universidad Nacional de Ingeniería. Peru

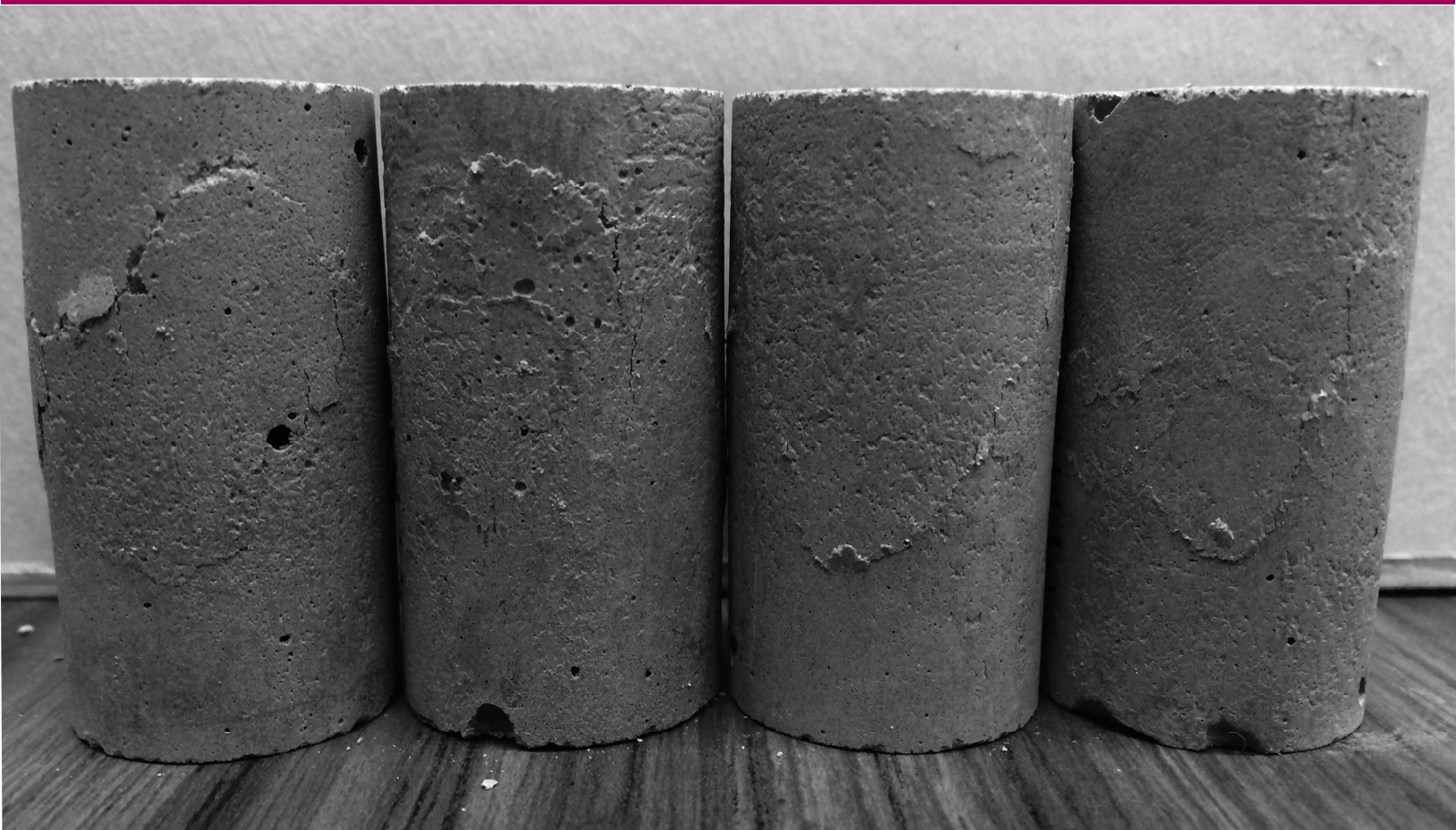


Imagen 9. Máquina de pruebas universales SHIMADZU modelo AG-100KNG, Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales del Instituto de Física de la UNAM.

CAPÍTULO

4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS



4.1. Identificación de sales solubles mediante tiras reactivas

Las normas de los materiales de construcción indican que cualquier arena puede ser empleada siempre y cuando esta se encuentre libre de impurezas como materia orgánica, cloruros, sulfatos y sales. Para comprobar si las arenas podrían ser empleadas en la elaboración de los morteros se les practicaron pruebas con tiras reactivas. Los resultados obtenidos se reportan en la siguiente tabla.

Tabla 9. Resultados identificación de sales solubles.





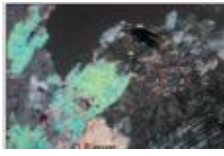
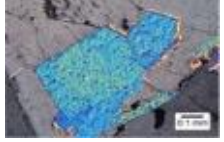

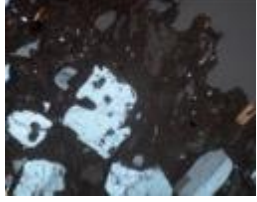
ARENA	CLORURO	NITRATO	SULFATO
ROSA	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO
GRIS	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO
POLVO DE PIEDRA	NEGATIVO	NEGATIVO	NEGATIVO

Debido a los resultados obtenidos se concluyó que las arenas que se adquieren como material de construcción se encuentran libres de impurezas y/o han sido previamente lavadas.

4.2. Análisis petrográfico de las arenas empleadas

Como parte de la caracterización de las arenas empleadas, resulta de gran importancia poder definir con exactitud los elementos que las conforma. La primera muestra examinada fue la arena rosa, la cual en una examinación a nivel macroscópica presenta granos de colores verdes, negros, rojo y rosado, en diversos tamaños. De la exploración a nivel microscópico de la lámina delgada se pudo determinar la presencia de elementos pertenecientes a diferentes grupos minerales, este resultado se reporta en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados identificación de minerales en laminas petrograficas.

Mineral	Sistema Cristalino	Tarjeta PDF	Tarjeta ICSD	Foto referencia	Foto lámina delgada	Observaciones	
1	Albita	Triclínico	01-079-1148	0000537			Al ser un material triclinico los ejes no quedan alineados con los de un cristal de forma regular por lo que presenta extinción generalmete de forma inclinada. Los colores de interferencia son los del primer orden.
2	Sanidina	Monoclínico	04-011-7479	250085			Bajo alivio negativo. Incoloro en la sección delgada, y la nubosidad es común. La birrefringencia es típicamente alrededor de .007, por lo que los colores de interferencia no son mayores que los de primer orden blanco.
3	Richterite	Monoclínico	00-050-1686	172313			Incoloro a amarillo o violeta en sección delgada. Pleocroísmo variable en tonos de amarillo pálido o verde con rojo de tonos naranjas.
4	Celadonita	Monoclínico	01-083-2008	0019223			
5	Quartz	Hexagonal	01-089-8935	0006363			Incoloro en sección delgada. Blanco con un tinte de amarillo. El cuarzo es reconocido por su bajo relieve, bajo birrefringencia y falta de escisión o hermanamiento. La plagioclasa es biaxial, tiene Clivaje, y por lo general se hermana. La ortoclasa y la sanidina son biaxiales, tienen Clivaje, y puede mostrar un solo plano gemelo

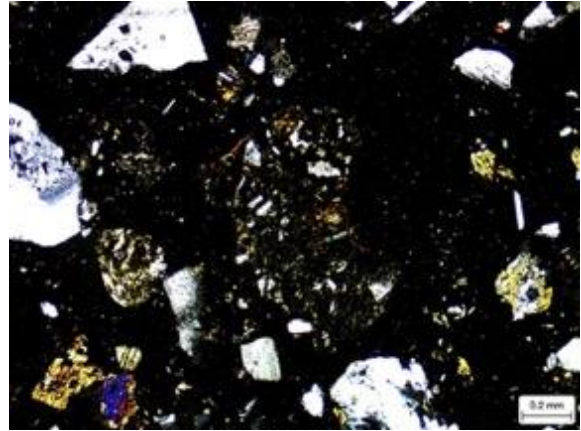
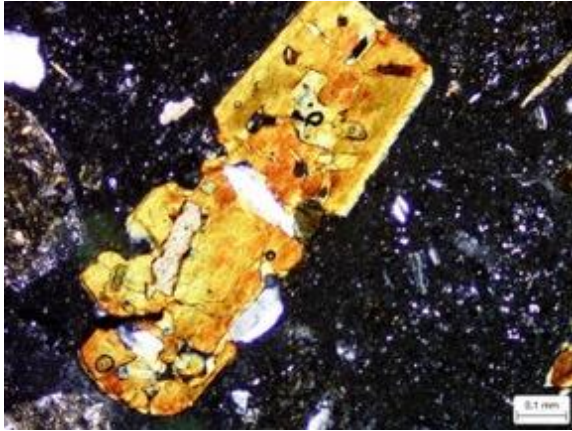


Imagen 10 y 11) lamina petrográfica de arena rosa observada con nicoles cruzados, identificando hornblendas y plagioclasas.

Se realizó la examinación de la lamina delgada de la arena gris, en esta arena a nivel macroscópico solo podemos distinguir elementos de color negro, gris y verde. En la exploración a nivel microscópico se identificaron minerales como plagioclasas, hornblendas y anfíboles, aunque entre las arenas observadas hay coincidencias en grupos mineralógicos, sin embargo, las diferencias consisten en los tamaños, las alteraciones y proporciones.

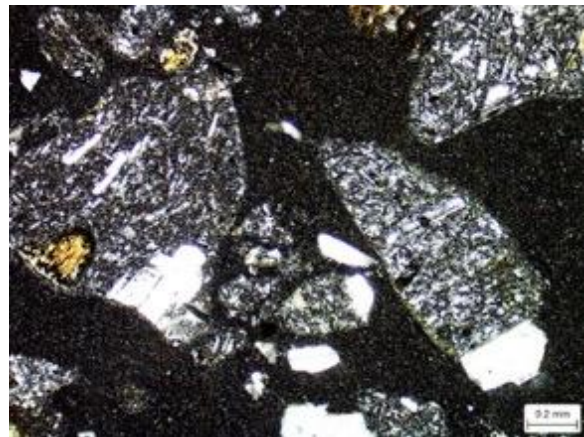
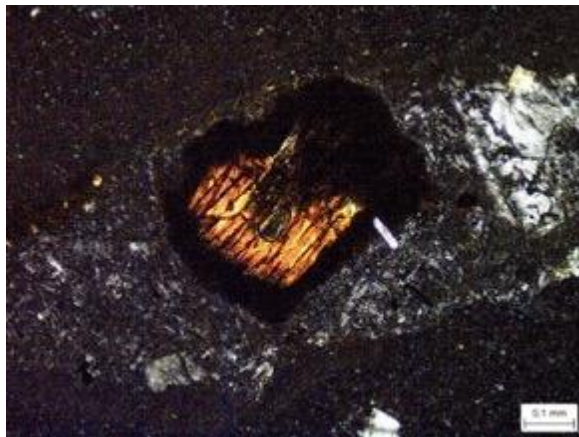


Imagen 12 y 13) Lamina petrográfica de arena gris, observada con nicoles cruzados.

4.3. Análisis de morfología e identificación mineralógica de las arenas y cementos mediante microscopia electrónica de barrido.

Las imágenes del SEM (Microscopia Electrónica de Barrido) de los diferentes tipos de arenas muestran que hay una gran diferencia morfológica entre cada tipo; el polvo de piedra, al provenir de la trituración de roca caliza presenta formas diversas de pronto con caras planas, angulosas e irregulares en su gran mayoría. Para poder obtener imágenes con mayor amplificación fue necesario montar la muestra en portaobjetos de aluminio pulido a espejo y recubierto con un baño de oro para poder trabajar la muestra en el microscopio electrónico en alto vacío.

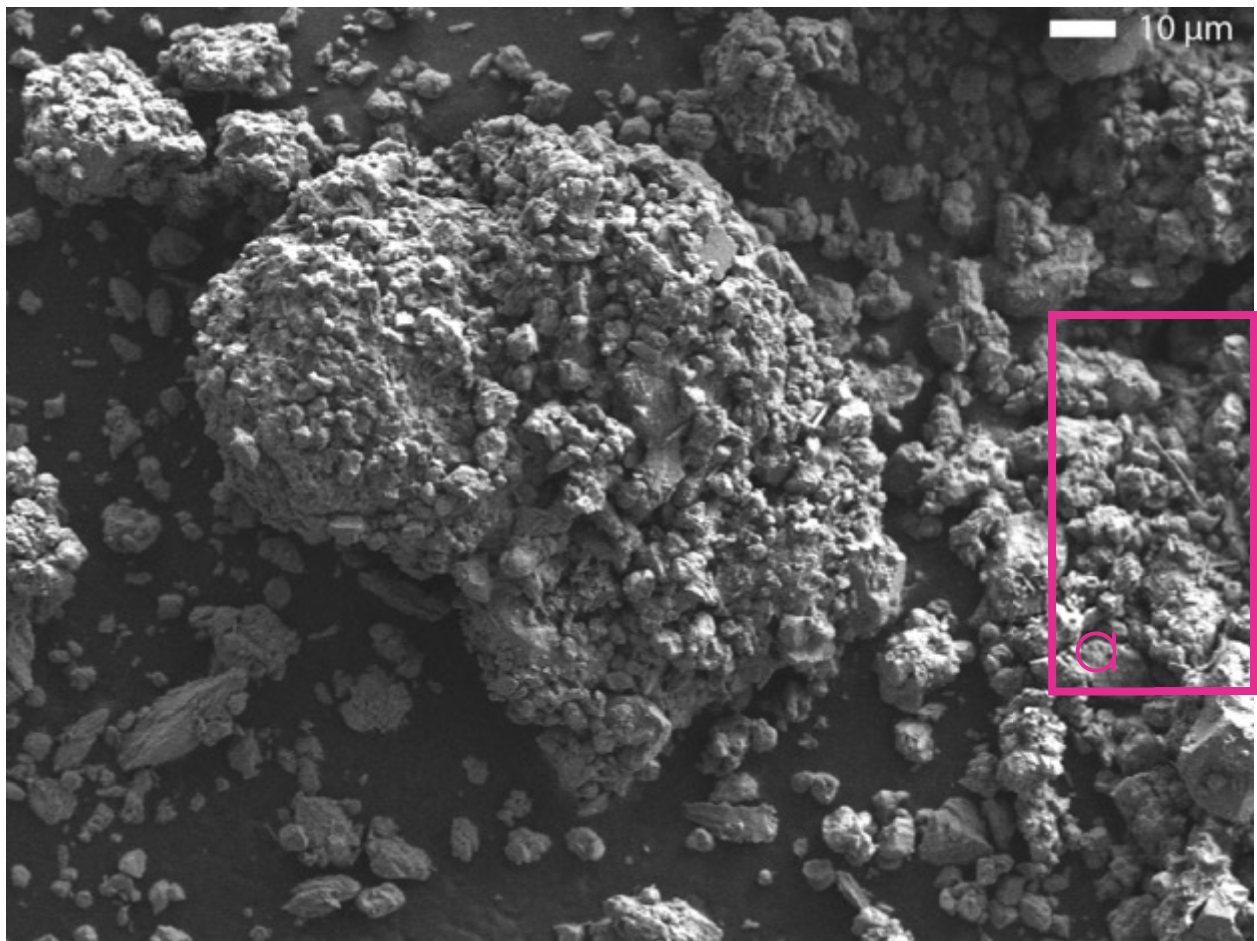


Imagen SEM 1. Muestra de polvo de piedra montada sobre cinta de carbono,

En la imagen obtenida mediante el microscopio electrónico de barrido del polvo de piedra se puede observar que al provenir de la trituración de rocas la forma de las partículas es muy irregular, con poca esfericidad. En la zona a) de la imagen se encuentran partículas en forma de barra características del calcio, es importante recordad que la esfericidad de las partículas de las arenas afecta el empaquetamiento de la misma cuando se mezcla con la pasta de cemento, demasiada esfericidad impide que las partículas se adhieran de forma adecuada.

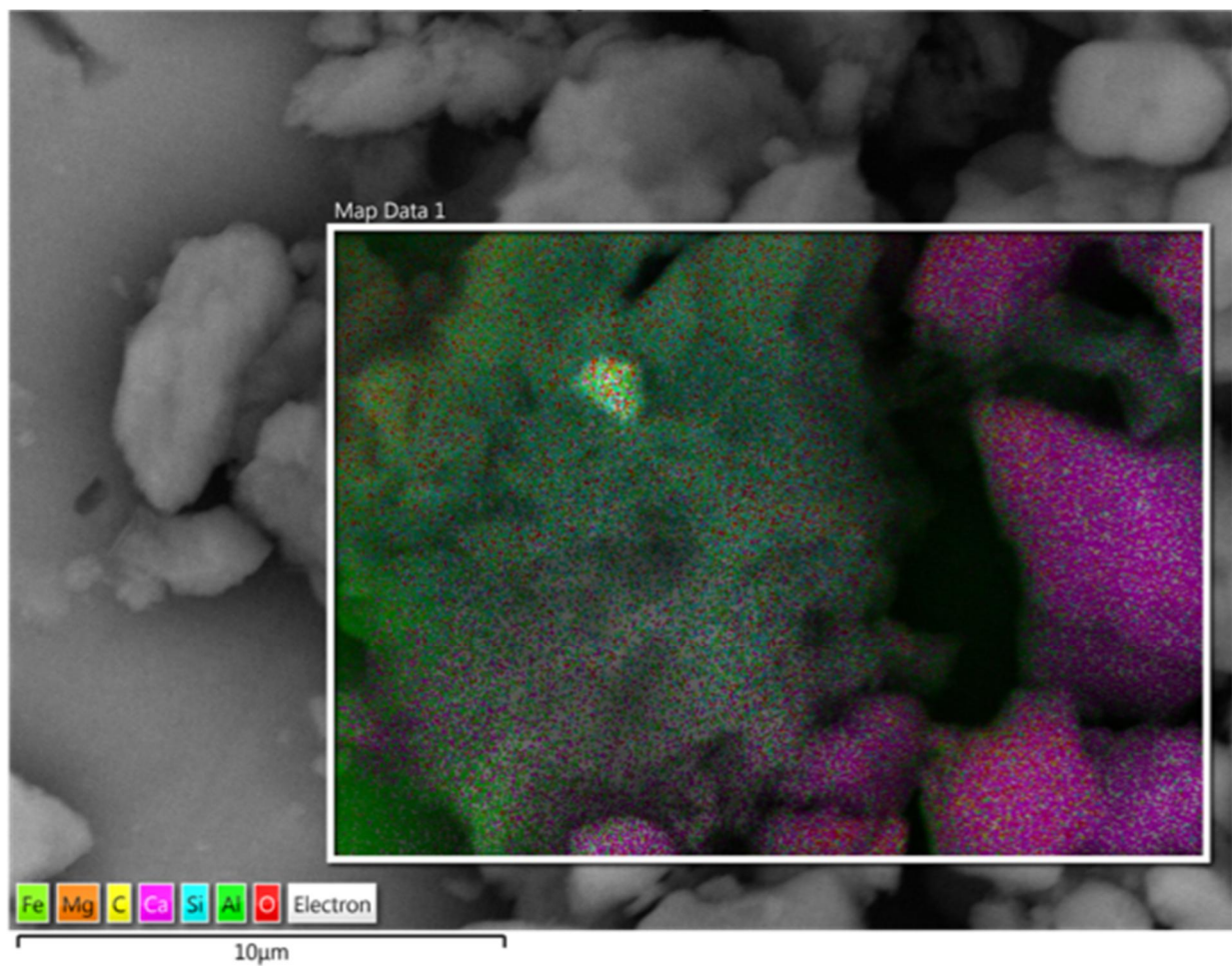


Imagen SEM 2. EDS por mapeo, polvo de piedra.

Análisis químico elemental realizado a la muestra de polvo de piedra mediante dispersión de energía en el microscopio electrónico de barrido, punto de partida en la identificación mineralógica. Tal como se mencionó en la imagen anterior, existe un gran contenido de calcio y sílice.

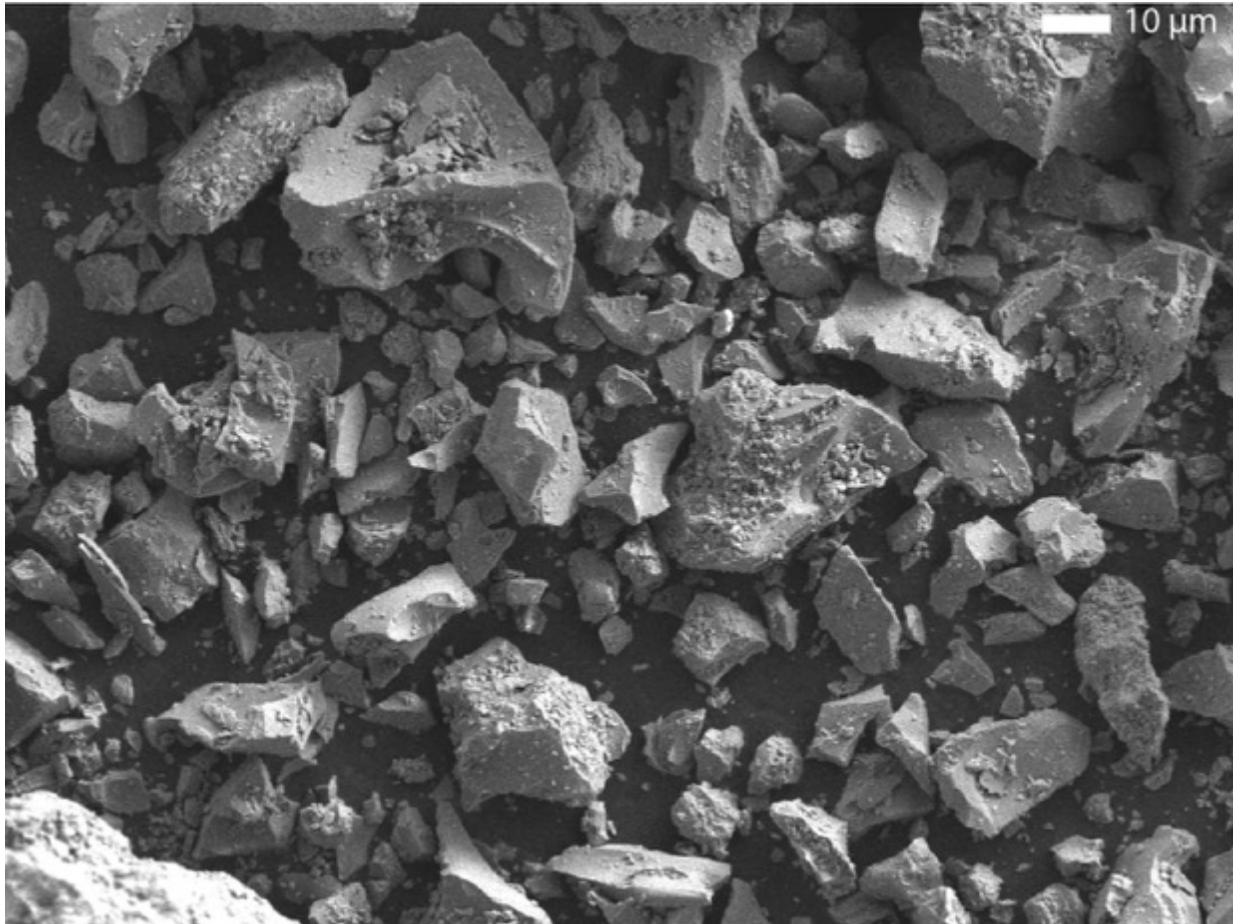


Imagen SEM 3. Muestra de arena rosa montada sobre cinta de carbono

La imagen obtenida muestra morfología semiangular a angular en las partículas de la arena, además de que existen granos de tamaños variados, a diferencia de la muestra del polvo de piedra aquí no se nota que las partículas tiendan a conglomerarse; esto se debe a que el tipo de arena conserva un menor grado de humedad.

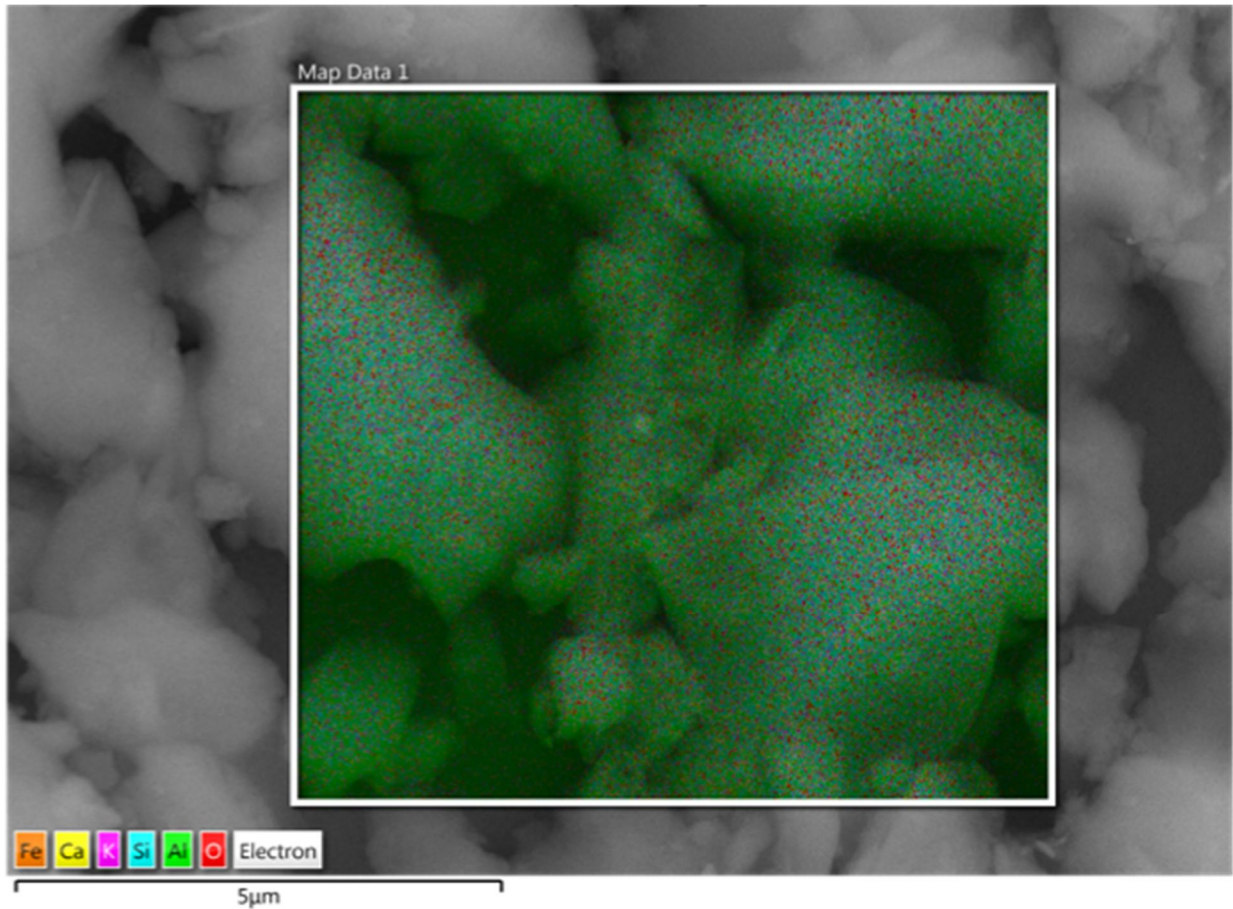
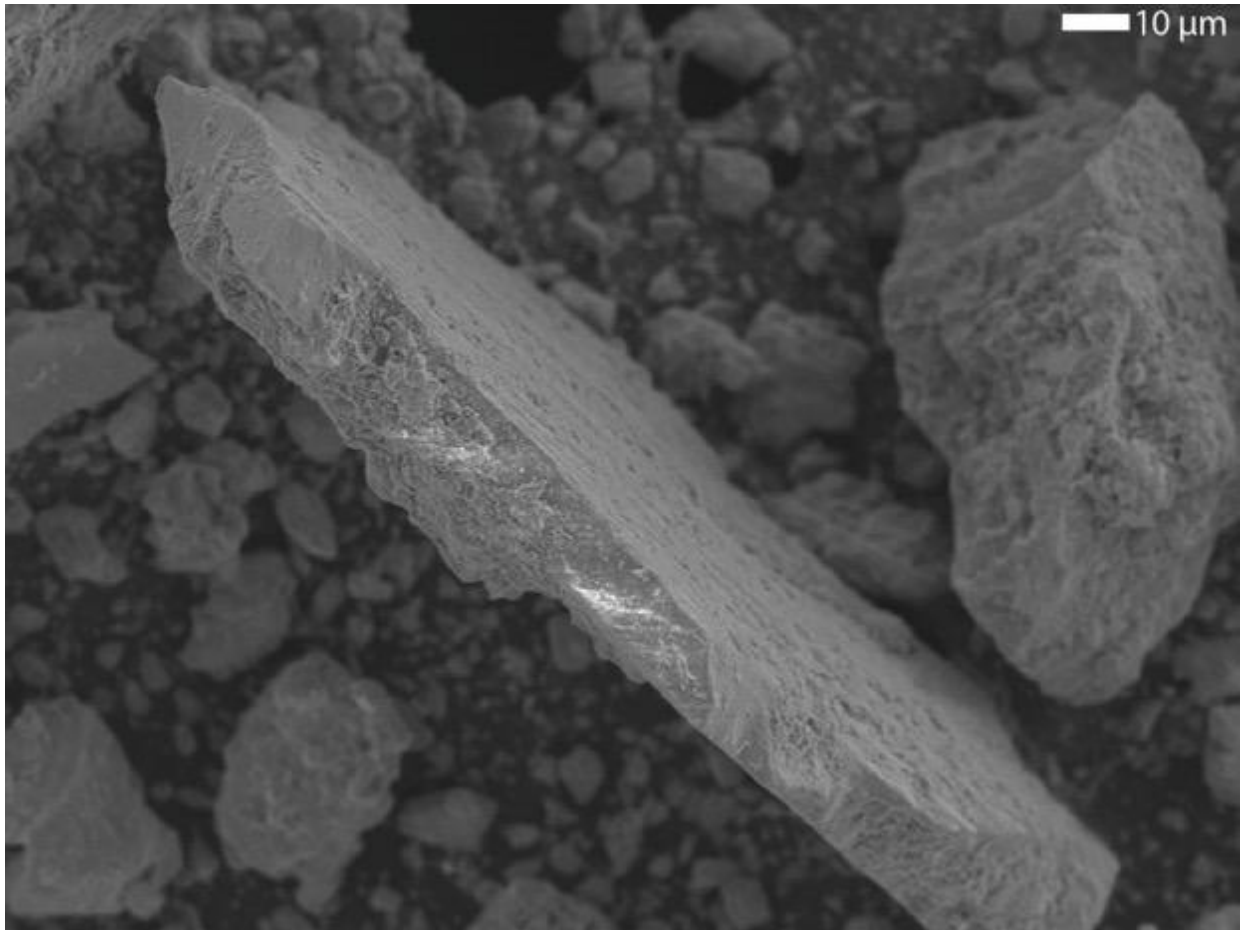


Imagen SEM 4. Microscopia con zona de mapero para la arena rosa.

En la imagen 4 obtenida mediante el microscopio electrónico de barrido se señala con el recuadro blanco la zona donde se realizó la identificación mineralógica por medio de dispersión de electrones, debido a que la muestra está montada sobre un portamuestras de aluminio dicho elemento se descarta momentáneamente como principal componente de las fases.

Se observa especial predominancia de Silicio, Hierro y Potasio, considerando las observaciones realizadas en las láminas delgadas y los datos obtenidos de la identificación mineralógica se ha determinado que la coloración rosa de la arena se debe al contenido de hierro, mismo que genera también partículas en colores marrones y verdes.



Imágen SEM 5. Muestra de arena gris montada sobre cinta de carbono

La morfología observada de la arena gris indica que esta compuesta de partículas de formas variadas puesto que, en la imagen, se puede ver que existen formas alargadas en dos ejes y corta en uno, pero también; hay presencia de granos sub angulos y/o subredondeados. La forma de las partículas tan variadas indica que hay granos que han sufrido mayor abrasión que otros debido a la historia de transporte. ³³

³³ Montijo Gonzále. (2014). Petrología de rocas Detríticas. 20 / 07 / 2016, de Universidad de Sonora Sitio web: <http://gaia.geologia.uson.mx/academicos/amontijo/detríticas/elementos.htm>

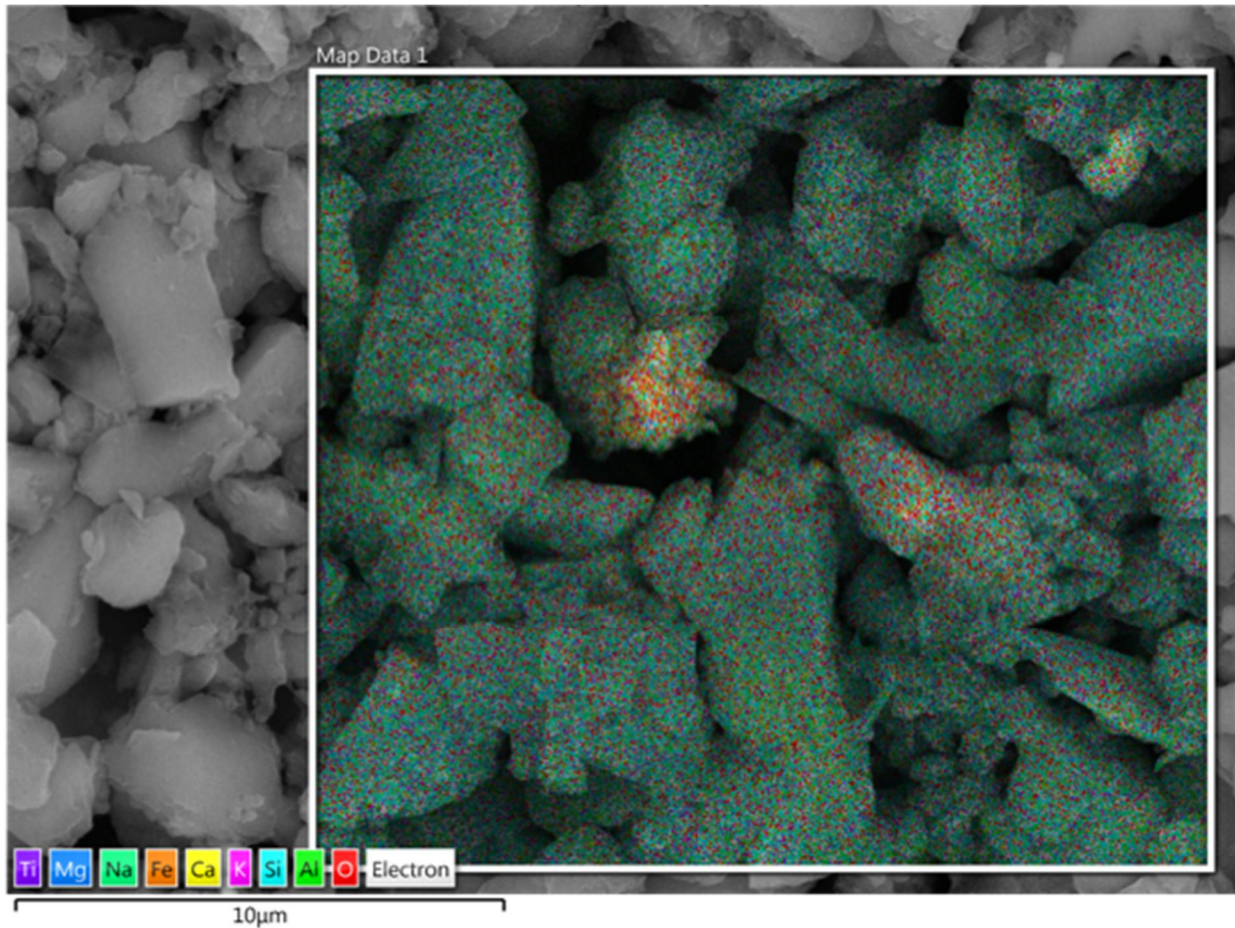
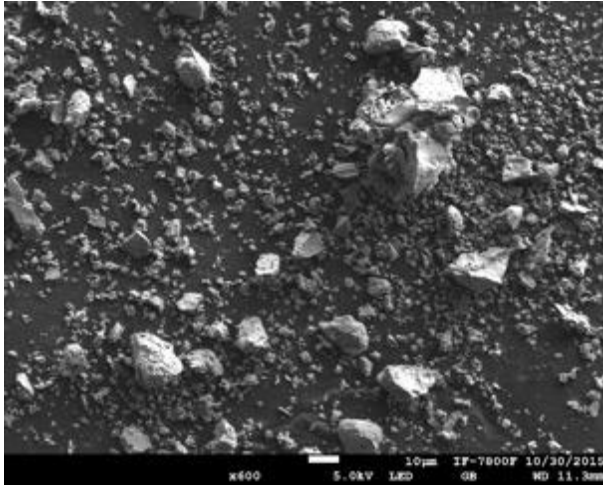


Imagen SEM 6. Microscopia con zona de mapeo para identificación mineralógica.

La zona señalada con el recuadro blanco señala la zona donde se realizó el escaneo para la identificación mineralógica mediante dispersión de electrones, al igual que en las muestras de las otras arenas se descarta el Aluminio como principal componente, en este caso el Sodio también se descartó debido a que la concentración era muy pobre y, previamente en la identificación de sales y sulfatos los resultados fueron negativos.

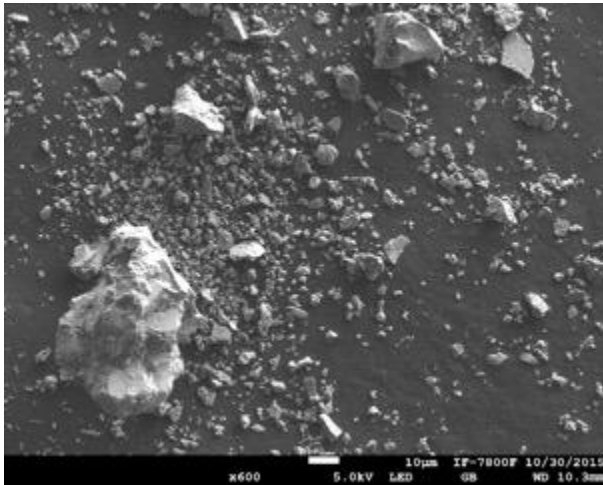
Cemento C1. Imagen SEM 7



Las imágenes SEM 7, 8 Y 9 de la microscopía electrónica de barrido de los polvos de cemento portland gris analizados, muestran que, aunque los tres cementos son portland tipo I las partículas son diferentes en morfología y tamaño.

El cemento C1 tiene partículas finas, medias y grandes. En las partículas de tamaño mediano observamos formas puntiaguadas, barras e indefinidas.

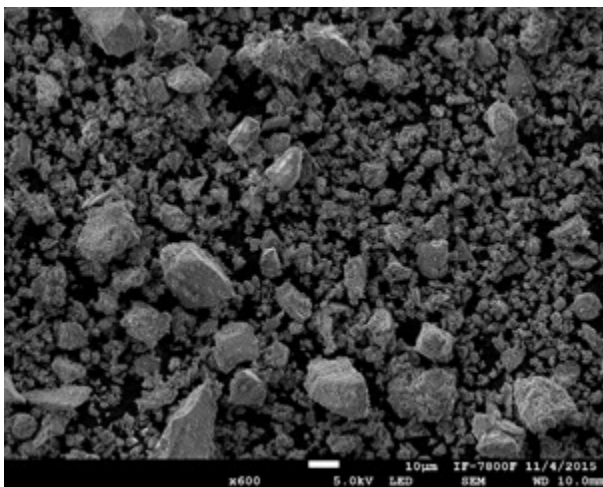
Cemento C2. Imagen SEM 8



El cemento C2 presenta partículas de mayor tamaño que el C1, esta diversidad esta en factor directo de la molienda y calcinación del clinker. Se puede observar que al igual que en el C1 existen formas angulosas e indefinidas.

El cemento C3, a diferencia de los otros dos, presenta una molienda con mayor uniformidad y, aunque sus particulares también tienden a ser angulosas lo son en menor proporción que las otras marcas.

Cemento C3. Imagen SEM 9



Para el caso de los cementos no se tiene reportado que la forma de la partícula afecte en alguna forma química, física o mecánica a las pastas, morteros o concretos.

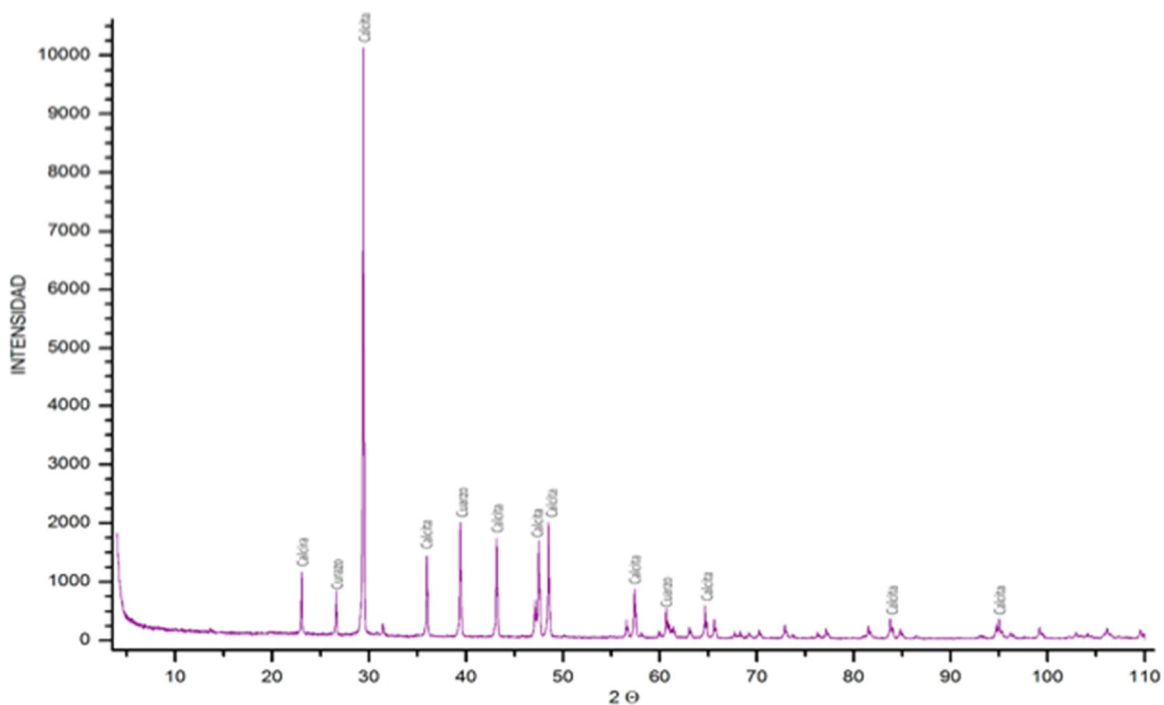
Sin embargo, a un mayor tamaño de partícula mayor será el tiempo de hidratación que esta requiera; por lo que idealmente un cemento óptimo será aquel cuyas partículas presenten un tamaño homogenizado y de cierto tamaño.

4.4. Identificación de fases mineralógicas mediante Difracción de Rayos X-DRX y refinamiento Rietveld de arenas y cementos

Como parte de las técnicas de caracterización de los diferentes materiales empleados se realizó difracción de rayos X a los polvos de cementos y arenas; los resultados obtenidos son muy importantes para el estudio de la estructura cristalina y así poder llevar a cabo la cuantificación de la composición de dichos materiales. Los difractogramas obtenidos para cada una de las arenas permitieron identificar y cuantificar las diferentes fases mineralógicas que las componen.

Para la identificación de fases se utilizó la base de datos del ICDD³⁴, en las tablas 11, 12 y 13 aparecen la cuantificación y toda la información relevante al análisis Rietveld realizado en cada una de las muestras.

Imagen 14. Difractograma con identificación de fases del polvo de piedra



³⁴ ICDD, Centro Internacional para la Difracción de Datos, por sus siglas en inglés. Es una asociación científica sin fines de lucro que se dedica a recolectar, recolectar, editar, publicar y distribuir datos de difracción de polvo para la identificación de materiales.

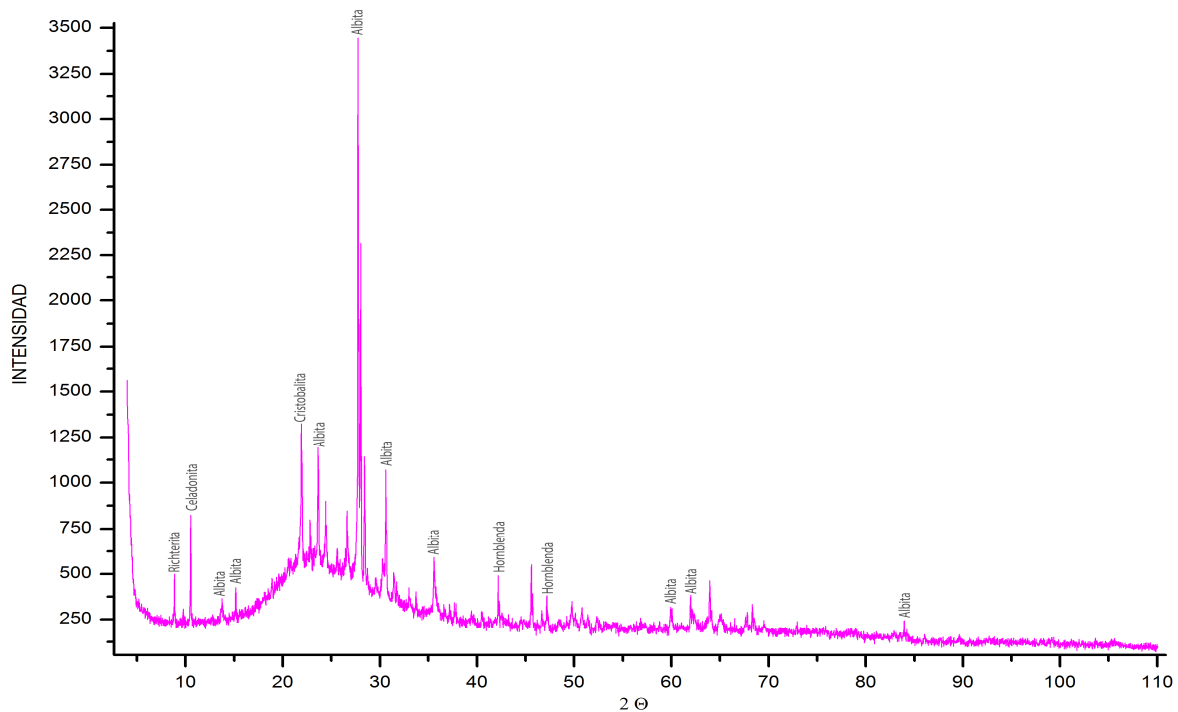
Las fases cristalinas identificadas en la muestra del polvo de piedra fueron dos:

- Calcita identificada mediante la tarjeta 37241 del ICSD, con reflexion principal en el angulo 29.7
- Cuarzo identificado mediante la tarjeta 27745 del ICSD, con reflexion principal en el angulo 26.3 y 20.7

Tabla 11. Resultados análisis Rietveld del polvo de piedra.

Fase	Formúla	Parametros refinados						Porcentaje en peso
		Factor de escala	Orientación preferencial	Celdas Unitarias				
				a	b	c	β	
Carbonato de calcio	CaCO ₃	x	x	x	x	x	-	93.05
Dioxido de silicio	SiO ₂	x	x	x	x	x	-	6.95

Imagen 15. Difractograma con identificación de fases de la arena rosa



Las fases cristalinas identificadas en la muestra de la arena rosa fueron:

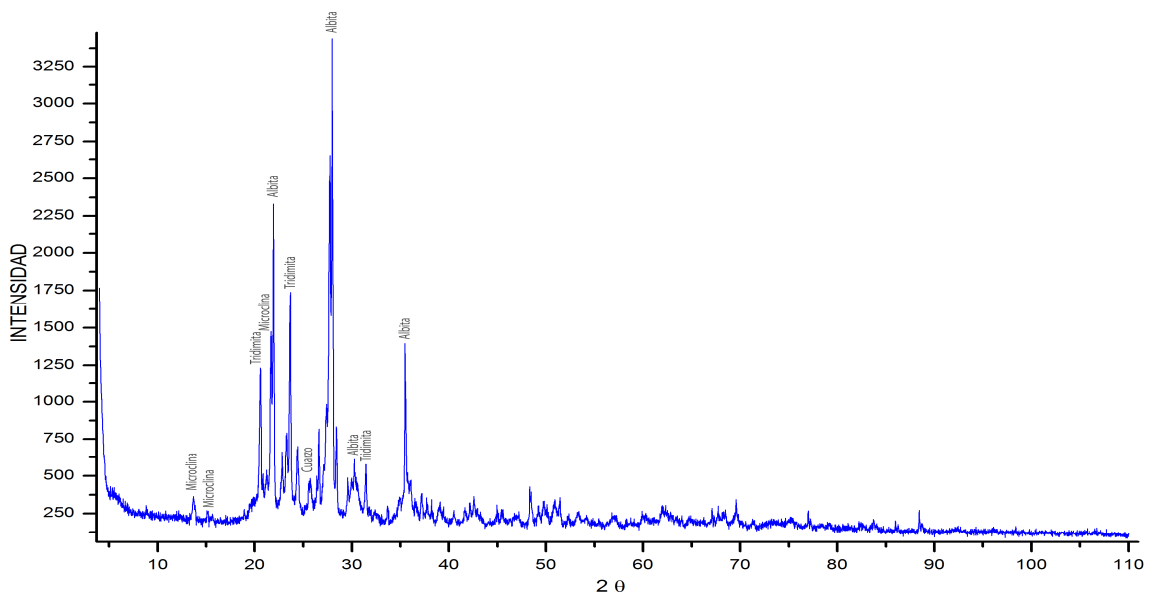
- Albita identificada mediante la tarjeta 0000537 del AMSCD, con reflexion principal en el angulo 27.8

- Anortita identificada mediante la tarjeta 30124 del ICSD, con reflexion principal en el angulo 27.9
- Celadonita identificada mediante la tarjeta 0019223 del AMSCD, con reflexión principal en el angulo 17.81
- Cuarzo identificado mediante la tarjeta 0006363 del AMSCD, con reflexión principal en el angulo 26.70
- Richterita identificado mediante la tarjeta 172313 del ICSD, con reflexión principal en el angulo 32.74
- Sanidina identificada mediante la tarjeta 250085 del ICSD, con reflexión principal en el angulo 26.7, 29.7 y 25.6

Tabla 12. Resultados análisis Rietveld de arena rosa.

Fase	Formúla	Parametros refinados						Porcentaje en peso
		Factor de escala	Orientación preferencial	Celdas Unitarias				
				a	b	c	β	
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	x	x	x	x	x	-	38.61
Albita baja	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	x	x	x	x	x	-	21.88
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	x	x	x	x	x	-	21.88
Celadonita	$\text{KMgFe}^{3+}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	x	x	x	x	x	-	5.75
Cuarzo	SiO_2	x	x	x	x	x	-	4.95
Richterita	$\text{Na}(\text{CaNa})\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	x	x	x	x	x	-	4.42
Sanidina	$(\text{KNa})(\text{SiAl})_4\text{O}_8$	x	x	x	x	x	-	2.45

Imagen 16. Difractograma con identificación de fases de la arena gris



Las fases cristalinas identificadas en la muestra de la arena gris fueron:

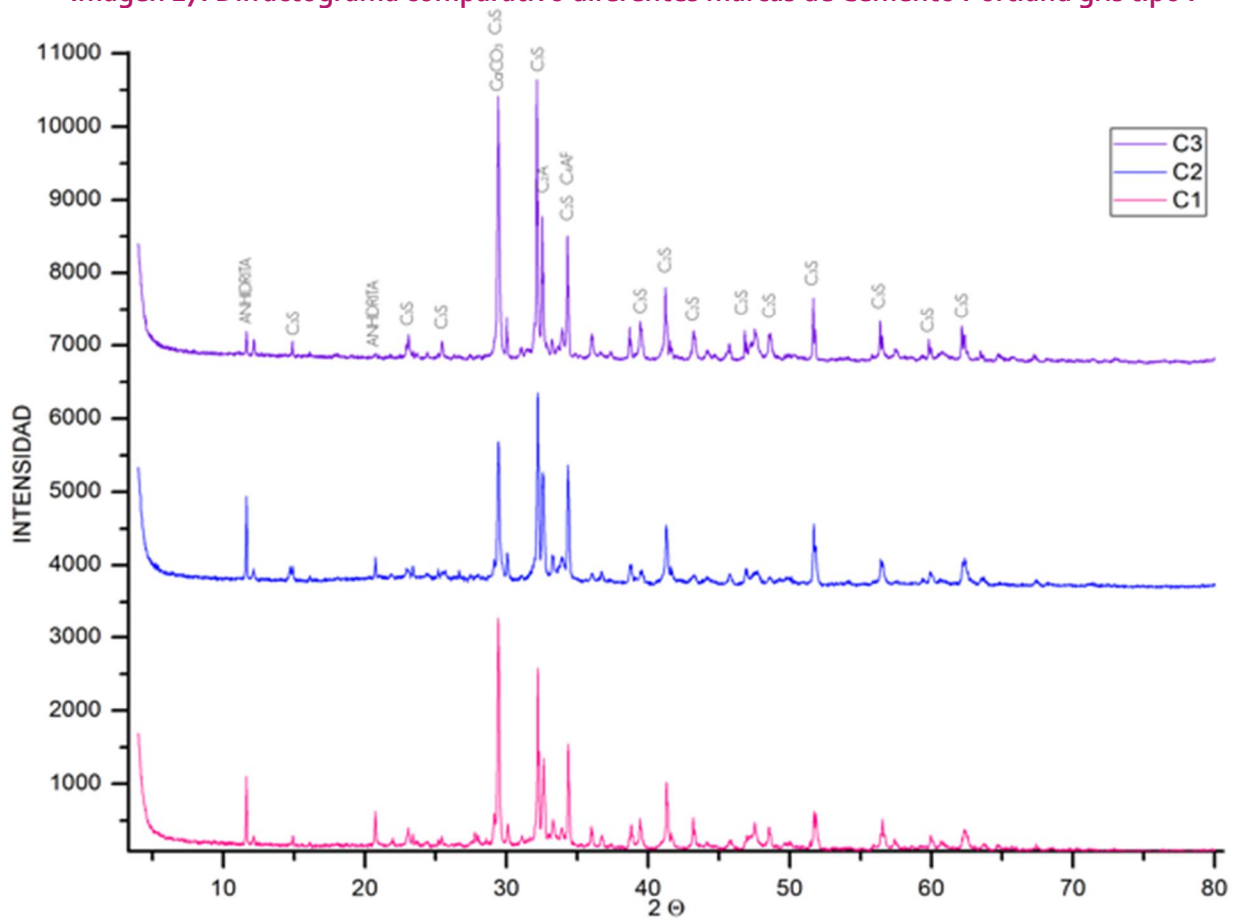
- Microclina identificada mediante la tarjeta 34896 del ICSD, con reflexión principal en el ángulo 27.6
- Tridimita identificada mediante la tarjeta 176 del ICSD, con reflexión principal en el ángulo 20.6
- Cuarzo identificado mediante la tarjeta 156196 del ICSD, con reflexión principal en el ángulo 26.7
- Albita identificada mediante la tarjeta 0019660 del AMCSD, con reflexión principal en el ángulo

Tabla 13. Resultados análisis Rietveld de arena gris. Falta el porcentaje en peso

Fase	Formúla	Parámetros refinados						Porcentaje en peso
		Factor de escala	Orientación preferencial	Celdas Unitarias				
				a	b	c	β	
Microclina	$KAlSi_3O_8$	x	x	x	x	x	-	15.75
Tridimita	SiO_2	x	x	x	x	x	-	5.28
Cuarzo	SiO_2	x	x	x	x	x	-	11.52
Albita	$NaAlSi_3O_8$	x	x	x	x	x	-	67.45

Los difractogramas obtenidos para las muestras de cemento indican que se encuentran presentes en las tres marcas todas las fases cristalinas que componen a un cemento portland tipo I, sin embargo, para cada una la cuantificación de dichas fases es diferente; lo cual puede deberse a que el banco de extracción para cada uno de los cementos estudiados es diferente, así como las adiciones minerales que emplean cada una de las cementeras en la elaboración del polvo. La cuantificación de fases cristalinas se reporta en las tablas 14, 15 y 16.

Imagen 17. Difractograma comparativo diferentes marcas de Cemento Portland gris tipo I



Las fases cristalinas identificadas en las muestras del polvo de los cementos portland fueron:

- Silicato dicálcico identificado mediante la tarjeta 963 del ICSD con reflexión principal en el ángulo 34
 - Silicato tricálcico identificado mediante la tarjeta 1540705 del AMCSD con reflexión principal en el ángulo 29
 - Aluminato tetracálcico identificado mediante la tarjeta 1841 del ICSD con reflexión principal en el ángulo
 - Aluminoferrita identificado mediante la tarjeta 26475 del ICSD con reflexión principal en el ángulo 34
 - Carbonato de calcio identificado mediante la tarjeta 16710 del ICSD con reflexión principal en el ángulo 29
 - Anhidrita identificada mediante la tarjeta 2058 del ICSD con reflexión principal en el ángulo
- 12

Tabla 14. Resultados análisis Rietveld del Cemento 1

Fase	Formúla	Parámetros refinados						Porcentaje en peso
		Factor de escala	Orientación preferencial	Celdas Unitarias				
				a	b	c	β	
Alita	C ₃ S	x	x	x	x	x	x	50.1
Belita	C ₂ S	x	x	x	x	x	x	8.63
Celita	C ₃ A	x	x	x	x	x	-	1.73
Ferrita	C ₄ AF	x	x	x	x	x	-	3.73
Yeso	CaSO ₄ - H ₂ O	x	x	x	x	x	x	3.72
Carbonato	CaCO ₃	x	-	x	x	x	-	32.06

Tabla 15. Resultados análisis Rietveld del Cemento 2

Fase	Formúla	Parámetros refinados						Porcentaje en peso
		Factor de escala	Orientación preferencial	Celdas Unitarias				
				a	b	c	β	
Alita	C ₃ S	x	x	x	x	x	x	12.42
Belita	C ₂ S	x	x	x	x	x	x	35.32
Celita	C ₃ A	x	x	x	x	x	-	0.77
Ferrita	C ₄ AF	x	x	x	x	x	-	11.52
Yeso	CaSO ₄ - H ₂ O	x	x	x	x	x	x	13.54
Carbonato	CaCO ₃	x	-	x	x	x	-	26.43

Tabla 16. Resultados análisis Rietveld del Cemento 3

Fase	Formúla	Parámetros refinados						Porcentaje en peso
		Factor de escala	Orientación preferencial	Celdas Unitarias				
				a	b	c	β	
Alita	C ₃ S	x	x	x	x	x	x	33.03
Belita	C ₂ S	x	x	x	x	x	x	7.34
Celita	C ₃ A	x	x	x	x	x	-	0.96
Ferrita	C ₄ AF	x	x	x	x	x	-	1.8
Yeso	CaSO ₄ - H ₂ O	x	x	x	x	x	x	1.48
Carbonato	CaCO ₃	x	-	x	x	x	-	47.49

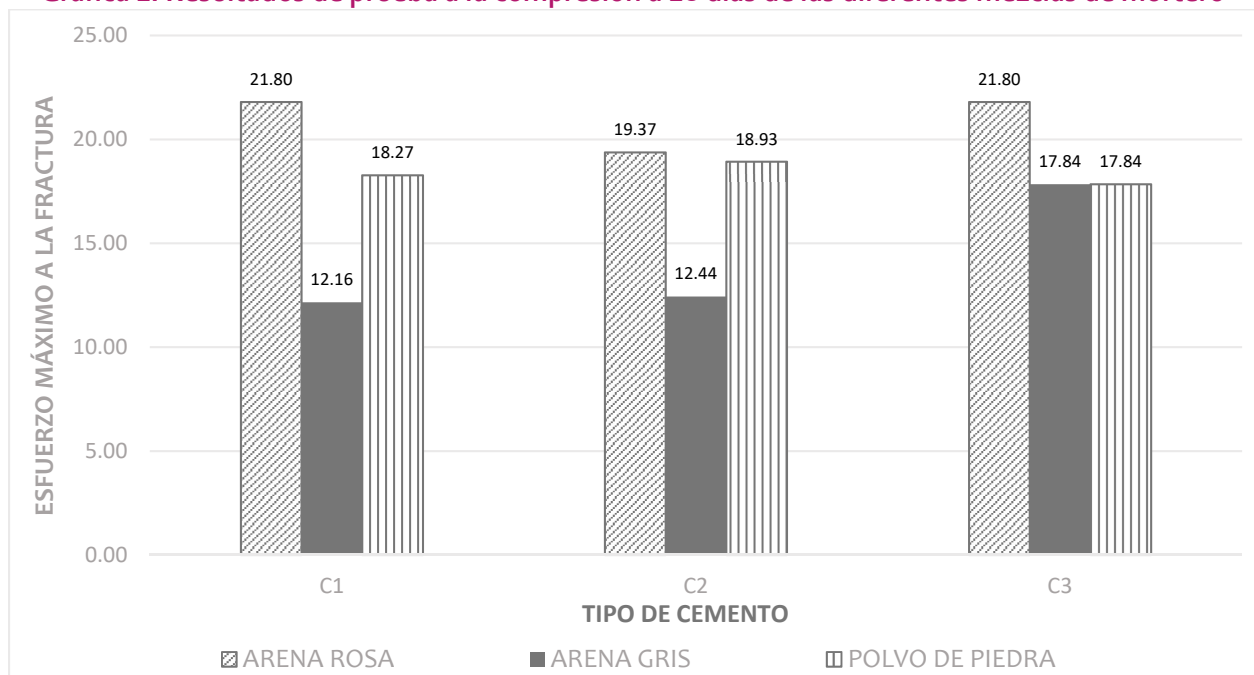
En el estudio y caracterización de los cementos es muy importante realizar la identificación de fases y comprobar que estos contienen las cantidades necesarias de Silicato tricálcico, Silicato dicálcico, Aluminoferrita tetracalcica, Celita tricalcica y Yeso para poder comprobar que cumplen con los requerimientos de la norma NMX-C-414-ONNCCE "Industria de la construcción-Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba"

4.5. Pruebas de resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de mortero

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a la compresión de los nueve tipos de mezclas de Mortero elaboradas, se midió la resistencia a los 3, 7, 14 y 28 días según lo indica la norma ASTM C 109/C 109M, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars."

La norma establece que se debe tener de dos a tres probetas por día de prueba como mínimo, sin embargo, a mayor número de muestras probadas los datos estadísticos obtenidos de dicho análisis serán de mayor fiabilidad.

Gráfica 1. Resultados de prueba a la compresión a 28 días de las diferentes mezclas de mortero



En la grafica 1 se reportan los resultados de las pruebas a compresión a los 28 días de endurecimientos se puede destacar el hecho que el mortero elaborado con el cemento 1 y arena rosa es un 79.27 % más resistente que el mortero elaborado con cemento 1 y arena gris.

La norma mexicana NMX-C-486 "Mortero para uso estructural", establece que la resistencia mínima es de 18.8 Mpa para un mortero tipo I, por lo que, solamente los morteros elaborados con cemento 1 y cemento 2 con adición de arena rosa cumplirían con lo que establece la normatividad vigente. Para morteros tipo II la resistencia mínima es de 11 Mpa y para morteros tipo III es de 6 Mpa; considerando esto podemos generalizar que las mezclas evaluadas son clasificadas como morteros estructurales.

4.6. Análisis de las mezclas de mortero mediante microscopia óptica

La microestructura de un material es imperceptible para el ojo humano, para el caso de los morteros que resultan de una mezcla homogénea entre la matriz del cemento y la matriz del agregado fino. La estructura de este tipo de material se caracteriza por el tamaño, forma, cantidad y distribución de los componentes y la zona de transición entre estos.

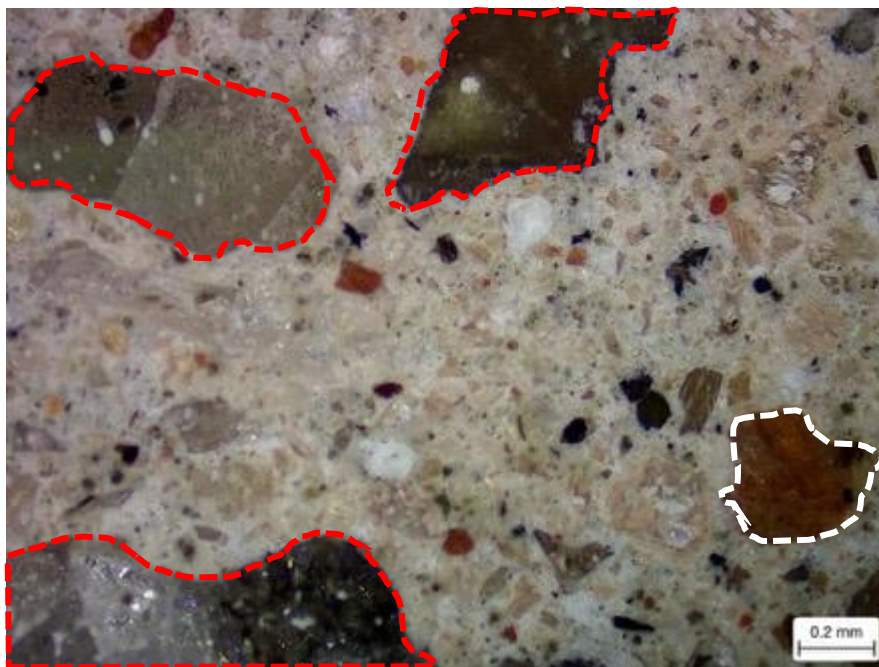


Imagen 18. Microscopia óptica de mortero elaborado con arena rosa.

En la imagen No. se puede observar granos del agregado fino de tamaño grande delimitados por la línea punteada de color rojo, granos de tamaño medio delimitados por la línea blanca y finalmente observamos una mezcla homogénea entre arena y cemento. Debido a los minerales que conforman a la arena rosa, observamos partículas que van de los tonos negros-rojizos a los cafes claros y transparentes.

No se observan agrietamientos ni cavidades de gran tamaño, la zona de transición entre arido y matriz cementante es estable para este tipo de mortero. Las partículas de menor tamaño son limos y arcillas que quedaron embebidos homogéneamente dentro de la pasta del cemento.

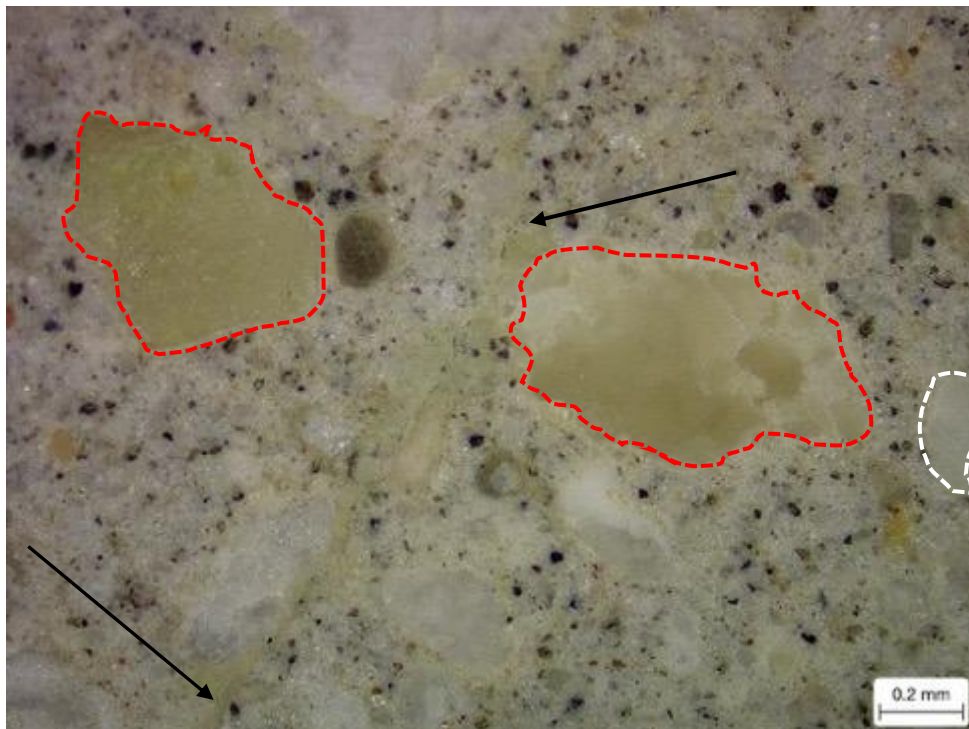


Imagen 19. Microscopia de mortero elaborado con polvo de piedra.

El polvo de piedra al ser una arena que esta compuesta en un 93% por carbonato de calcio, presenta tonalidades blanco - amarillo en su mayoría, sin embargo, en la microscopia podemos observar que en las partículas de tamaño fino se presentan colores negros, grises y cafes oscuros, esto se debe a que las piedras sufren alteraciones de manera continua. La zona marcada con la línea

de puntos en color blanco señala un cumulo de pasta de cemento que no ha logrado integrarse con la matriz del agregado fino. Las zonas marcadas por la línea punteada de color rojo señalan granos del polvo de piedra de gran tamaño.

Existe un agrietamiento señalado con las flechas de color negro, que pasa por la zona de transición entre granos de tamaño medio y matriz cementante, esta se puede haber generado por la forma y distribución de las partículas de arena al momento de realizar la prueba de esfuerzo mecánico a la compresión.

The image features a background of a complex network diagram with numerous nodes and connecting lines. A large, solid magenta arrow points from the left side of the frame towards the right, partially overlapping the network. The word "CONCLUSIÓN" is written in white, uppercase letters across the center of the magenta arrow.

CONCLUSIÓN

El estudio de los materiales que conforman las mezclas de morteros de cemento portland se realizó a partir del método experimental, y implementar diversas técnicas analíticas y cuantitativas para definir los aspectos físicos, químicos y mecánicos de los morteros. Mediante el análisis de las diferentes pruebas realizadas se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- a) Para evitar fisuras en periodos cortos de tiempo fue importante conocer las características físico-químicas de la mezcla para estudiar el comportamiento según la norma.
- b) Durante el proceso de autoconstrucción existe descuido y regulación de dosificación de agua para hidratar el cemento en función de la temperatura ambiental. Motivo por el cual se sobredosifican y, no afectan de manera inicial.
- c) Con las pruebas mecánicas y la identificación de fases de los cementos se indentificó que los cementos portlan tipo I tienen comportamientos diferentes según la marca comercial, lo que dificulta la selección adecuada.
- d) Se debe considerar que la calidad de las arenas que intervienen en una mezcla es variable, por lo que es importante establecer el banco de extracción
- e) Los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas demuestran que seleccionar el tipo de cemento comercial para las diferentes arenas evita fallas a los procesos iniciales y permite mejorar las propiedades mecánicas del mortero sin la necesidad de emplear aditivos químicos dependiendo de los minerales.
- f) Los cementos comerciales varían químicamente en función de la marca y, la marca en función del banco de extracción de la piedra caliza.
- g) La aportación de las pruebas de laboratorio permitirá establecer a simple vista propiedades mecánicas.

h) A partir de los trabajos realizados con especialistas de diferentes áreas (Física, Química, Ciencia e Ingeniería de Materiales, Ingeniería y Arquitectura) permitió establecer un mejor comportamiento de la mezcla. Lo que hace necesario la formación de equipos multidisciplinarios de investigación para generar aportes a la edificación.

Bibliografía

Libros

1. Askeland, D., (2016) *Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Cengage Learning, Estado Unidos
2. Campbell, H.D (1999) *Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker*. 2da edición. USA: Portland Cement Association
3. Duran, J. (2000) *Sands, Powders, and Grains: An introduction to the Physics of Granular Materials*. 1ra Edición. New York: Springer Science + Bussines Media New York
4. Haldar S. (2014) *Introduction to mineralogy and petrology*. El Servier. Amsterdam
5. Hurlbult D. (1959) *Manual de Mineralogía*. 2da. Edición. Editorial Reverté. Barcelona.
6. Kosmatka, H. S et al. (2004) *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. 1ra edición. Illinois, EE. UU: Portland Cement Association
7. Kurdowski, W. (2014) *Cement and Concrete Chemistry*. 1ra edición. New York London: Springer Science + Bussines Media
8. Lima de Faria J. (1994) *Structural Mineralogy. An Introduction*. Solid Earth Sciencie Library 7. Springer Sciencie + Bussines Media. Portugal.
9. Mather B. y Ozyildirim C. (2002) *Cartilla del Concreto*. México. IMCYC
10. Metha K. y Monteiro P. (1998) *Concreto. Estructura, propiedades y materiales*. México. IMCYC
11. Montes, J., (2014) *Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Paraninfo, España
12. Neville M. A. (1999) *Tecnología del Concreto*. México. IMCYC
13. Olague C. (2003) *Agregados para concreto. Caracterización fisicoquímica de agregados para concreto hidráulico*. 1ra edición. Colecciónn Textos Universitarios. Universidad Autónoma de Chihuahua.
14. Quiroga, P y Fowler, W. D. (2003) *The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete*. 1ra edición. University of Texas at Austin: International Center for Aggregates Research Aggregates Foundation for Technology, Research, and Education
15. Raith M. et al. (2012) *Guía para la microscopía de minerales en lámina delgada*. RRR. Alemania.
16. Ramachandran V. y Beaudoin J. (2001) *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology. Principles, Techniques and Technology*. Noyes Publications. New Jersey. USA.
17. San Juan B. y Castro B. (2001) *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*. México. IMCYC
18. Scholle P. (1979) *A Color Illustrated Guide Yo Constituents, Textures, Cements, and Porosities of Sandstones and Associated Rocks*. The American Association of Petroleum Geologist. Tulsa, Oklahoma, U. S. A.
19. Soroka I. (1993) *Concrete in Hot Environments*. 1ra edición. E & FN Spon. Londres, Inglaterra.
20. Soroka, I (1997) *Portland Cement Paste and Concrete* 1ra edición. THE MACMILLAN PRESS LTD

21. St. John D. et al. (1998) *Concrete Petrography. A handbook of investigative techniques*. John Wiley & Sons Inc. New York .
22. Taylor, H. F. W. (1997) *Cement Chemistry*. 2da edición. Londres. Thomas Telford
23. Uribe R. (2004) *Manual de identificación, prácticas de minerales y rocas para su uso como agregados de concreto*. IMCYC México.
24. Wilhem C. (1969) *Introduction to mineralogy. Crystallography and Petrology*. 2da. Edición. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. New York, EE. UU.

Artículos

25. Alaejos G., P. y Fernández C., M (1996) *High-Performance Concrete: Requirements for Constituent Materials and Mix Proportioning*. *ACI Materials Journal* 93. pp: 233-241
26. Alatorre J. y Uribe R. (1998) *Agregados para concreto: cada cual su nombre*. Revista IMCYC. pp: 1-5
27. Alvarez J. (2005) *Caracterización de morteros para revestimiento con polvo de piedra*. Revista de la construcción 4. pp: 30 - 37
28. Alvarez J. et al. (2016) *Historia de los morteros*. Facultad de Ciencias. Universidad de Navarra pp: 1 - 22
29. Alexander M. G. (1996) *Aggregates and the Deformation Properties of Concrete* *ACI Materials Journal* 93. pp: 569-577
30. Apuy A. et al. (2014) *Mineralogía Óptica Descriptiva*. Curso de Mineralogía Óptica II. Escuela Centroamericana de Geología.
31. Brouwers H. (2007) *Composición de la pasta de cemento. Parte I*. *Cemento* 904. pp: 4 -28
32. Boubekour T. et al. (2014) *Estimation of mortars compressive strength at different curing temperature by the maturity method*. *Construction and Building Materials* 71. pp: 299-307
33. Céron M. et al. (1996) Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida. *Boletín académico FIUADY*. pp: 27 - 31
34. Chan J. et al. (2003) *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. *Ingeniería* 7. pp: 39 - 46
35. Daczko J. J. (1999) *Mortar Testing for Estimating Strength*. *Concrete International* 21. pp: 63-67
36. De la Torre A. et al. (2003) *Cuantificación mineralógica directa de cementos portland por el método de rietveld*. *Cemento* 850. pp: 16 - 27
37. Haín J. C. (1905) *Mortar Sand*. *Journal Proceedings* 1. pp: 42-50
38. Hoshino S. et al (2006) *XRD/Rietveld Analysis of the Hydration and Strength Development of Slag and Limestone blended Cement*. *Journal of Advance Technology* 4. pp:357-367
39. Le Saoût G. et al. (2011) *Aplication of the Rietveld method to the analysis of anhydrous cement*. *Cement and Concrete Research* 41. pp: 133 - 148
40. Ortiz J. et al () *Influencia de la temperatura ambiental sobre las propiedades de trabajabilidad y microestructurales de morteros y pastas de cemento*. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo* 1. pp: 2-24

41. Pannunzio E. et al. (2003) *Análisis Cuantitativo de Fases Presentes en Cemento Portland y Clinker por Medio de Análisis Rietveld de Patrones de Difracción de Rayos X de Polvos*. Materia 8. pp: 270 - 276
42. Pérez N. et al. (2016) *Quantification of amorphous phase in the silt fraction of Mexican pre-Hispanic adobe earth bricks*. Journal of applied crystallography 49. pp: 561-568
43. Petrick S. y Castillo R. (2004) *Método de rietveld para el estudio de estructuras cristalinas*.
44. Scrivener K. et al. (2004) *Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods*. Cement and Concrete Research 34. pp:1541-1547
45. Solis R. y Baeza J. (2003) *Influencia de las propiedades físicas de losa gregados en la técnica de pulso ultrasonico para predecir la resistencia a la compresión del concreto*. Revista Técnica de Ingeniería Univ. Zulia. 26 pp: 45 - 55
46. Stroh M. et al. (2016) *Time-resolved in situ investigation of Portland cement hydration influenced by chemical admixtures*. Construction and Building Materials 106. pp:18-26
47. Scrivener K. et al (2015) *Advances in understanding hydration of Portland Cement*. Cement and Concrete Research 78. pp: 38 -56
48. Tydlitát V. et al. (2014) *Effect of w/c and temperature on the early-stage hydration heat development in Portland-limestone cement*. Construction and Building Materials 50. pp:140-147
49. Zákoustský J. et al. (2012) *Effect of temperature on the early-stage hydration characteristics of Portland cement: A large-volumen calorimetric study*. Construction and Building Materials 36. pp:969-976

Tesis

50. Bouzon N. "Evaluación del proceso de hidratación de morteros de cemento con ceniza volante mediante métodos destructivos y no destructivos." Tesis de maestría. Ingeniería de la construcción y proyectos de obra civil. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2011.
51. Martín J. "Estudio del comportamiento durable de pastas y morteros de cemento en condiciones de agresividad." Tesis doctoral. Programa de doctorado de Estudios Avanzados en Química. Facultad de Química. Universidad de Sevilla. Sevilla, 2004.
52. Méndez R. "Determinación de la reactividad puzolánica de adiciones minerales de origen natural con el cemento portland." Tesis maestría. Centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional. Unidad Oaxaca. Instituto Politecnico Nacional. Oaxaca, 2008.
53. Molina O. "La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón." Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2008.
54. Muciño A. "Concreto Nanotecnológico. Resistencia mecánica de cementos reforzados con partículas submicrométricas." Tesis maestría. Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, 2010.
55. Ortiz, J., "Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado", Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.

56. Pérez N. "Los adobes arqueológicos de la Gran Pirámide de Cholula: Caracterización detallada de su composición relacionada con sus propiedades como material de construcción." Tesis doctoral. Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales. Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico 2016.
57. Soares N. "El rol físico del agua en las mezclas de cemento portland" Tesis doctoral. Departamento de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. España 2012.

Normas

58. ACI 221.R-01 (2012) *Guía para uso de agregados de masa normal y pesada en el concreto*
59. ASTM C33/C33M - 13. (2004). *Standard Specification for Concrete Aggregates.*
60. ASTM C 109/C 109M. (2007). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).*
61. ASTM C 144 - 04. (1997). *Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar.*
62. ASTM C1714/C1714M - 13^a. (2002). *Standard Specification for Preblended Dry Mortar Mix for Unit Masonry.*
63. ASTM C 186 - 98 (1998) *Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement*
64. ASTM C 270 - 07. (2002). *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry.*
65. ASTM C 511 - 03 (2003) *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*
66. ASTM C 684 - 94 (2003) *Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens.*
67. NMX - C - 486 - ONNCCE - 2014 *Mortero para uso estructural*

Abreviaturas

ACI: American Concrete Institute

AMCSD: American Mineralogist Crystal Structure Database

ASTM: American Society for Testing and Materials

C3A: Aluminato tricálcico

C4AF: Ferroaluminato tetracálcico

C2S: Silicato dicálcico

C3S: Silicato tricálcico

COD: Crystallography Open Database

CSD: Cambridge Structural Database

CSH: Silicato de calcio hidratado

DRX: Difracción de Rayos X

EDS: Espectroscopia de Energía Dispersa

ICDD: International Center for Diffraction Data

ICSD: Inorganic Crystal Structure Database

NMX: Norma Mexicana

ONNCE: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación

SEM: Microscopia Electrónica de Barrido

Glosario

Agregado pétreo.

material granular, arena empleada en la fabricación de morteros junto con el material cementante.

Clinker.

producto que resulta de la cocción de la piedra caliza // principal componente del cemento portland

Diseño de mezcla.

es el Proporcionamiento adecuado de los materiales que conforman el mortero (agua, cemento y arena)

Fase mineralógica.

compuesto químico presente en la estructura del material estudiado.

Ferrita.

Ferroaluminato tetracálcico, uno de los componentes principales del cemento portland gris.

Material parental.

roca de la cual provienen las arenas empleadas en la elaboración de morteros.

Mezcla plástica.

condición de la consistencia que permite al material soportar deformaciones sin romperse.

Morfología.

forma de los cristales de los minerales que componen las arenas y cementos.

Mortero.

mezcla de cemento portland gris, arena y agua // utensilio de laboratorio que sirve para moler manualmente diferentes materiales y/o sustancias.
