



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil

**Caracterización por microscopía electrónica de barrido para una nueva cal
hidráulica mejorada con puzolana**
TESIS

Que para obtener el Título de

Ingeniero Civil

Presenta:

María Isabel González Nava

Dirigida por:

M. en C. Miguel Galván Ruiz

SINODALES

M en C. Miguel Galván Ruiz

Presidente

Firma

M en I. Rubén Ramírez Jiménez

Sinodal

Firma

M en I. Gerardo René Serrano Gutiérrez

Sinodal

Firma

M en C. Joaquín Noriega Montes

Sinodal

Firma

Dr. Miguel Ángel Domínguez
Coordinador de Ingeniería Civil

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad
de Ingeniería

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Enero de 2008
México



C. U. 20 de noviembre de 2007

C. MARÍA ISABEL GONZÁLEZ NAVA
Pasante de Ingeniería Civil
Presente.

Con relación a su oficio enviado al H. Consejo Académico de la Facultad en el que solicita titularse bajo la opción de tesis individual, me permito informarle que en la sesión ordinaria del 20 de noviembre del año en curso, este cuerpo colegiado acordó aceptar la opción de titulación por lo que deberá trabajar en el tema "**Caracterización por microscopía electrónica de barrido para una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana**", bajo la dirección del M en C. Miguel Galván Ruiz.

El Contenido aceptado por el H. Consejo Académico es el siguiente:

Índice

Agradecimientos

Índice de Figuras

Índice de Tablas

Introducción

Justificación

Objetivos

Objetivo general

Objetivos específicos

Hipótesis de trabajo

Antecedentes

Capítulo I. Estado del arte

1.1 Preámbulo

1.2 Evolución de la cal

1.3 Propiedades físico-químicas de la cal

1.4 Algunos de los usos de la cal para la construcción

Capítulo II. Microscopía Electrónica de Barrido

2.1 Introducción a la microscopía electrónica de barrido

2.2 Resolución

2.3 Naturaleza de las ondas de electrones

2.4 Interacción haz incidente - muestra en el MEB

Capítulo III. Materiales y Métodos

3.1 Materiales

3.2 Elaboración de morteros

3.3 Métodos

Capítulo IV. Resultados y discusión

Conclusiones

No. Adq. E-11-73-888

No. Título _____

Clas. T5

620.135

G643c



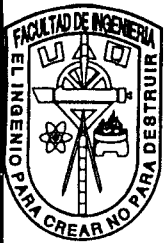
Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Dirección

Referencias

ANEXOS

Índice de Figuras

Índice de Tablas



También hago de su conocimiento las disposiciones de nuestra Facultad, en el sentido que antes del Examen profesional deberá cumplir con los requisitos de nuestra legislación y deberá imprimir el presente oficio en todos los ejemplares de su tesis.

Atentamente

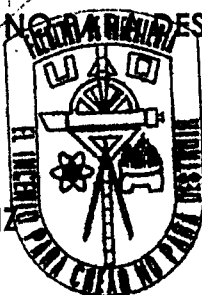
"EL INGENIO PARA CREAR NO PARA DESTRUIR"

DR. GILBERTO HERRERA RUIZ

Director

c.c.p. Archivo

*GHR/DHM.



DIRECCIÓN

Agradecimientos

El siguiente trabajo se debe al esfuerzo de personas por las que he estado rodeada en toda mi vida; en el trabajo, escuela, en el hogar, con la familia, amigos...

Sería un error hacer énfasis tan solo en algunos de ellos, cada quien por malo que parezca me ha enseñado algo para salir adelante.

Agradezco a todos aquellos que han tenido la suficiente confianza en mí como para brindarme su apoyo y que han seguido apoyándome sin que reciban nada a cambio.

Desde personas que me rodearon, así como instituciones que me apoyaron para llevar a cabo los experimentos para los resultados de esta tesis.

Solo me resta recordarles que nunca se dejen caer ante un problema, recuerden si se caen cinco veces levántense seis, recojan la piedra que los tumbo, para que los demás no vayan a caer y aprendan de ese tropiezo. Es tan sencillo contestar a una pregunta sin afectar a nadie, tan solo digan "depende de la persona", y tan sencillo aceptar lo que nos afecta, siempre recuerden que "por algo pasan las cosas".

Si alguna vez llegasen a necesitar de apoyo y no encuentran a nadie a su alrededor que se los brinde, y no estoy yo en ese momento físicamente para apoyarlos, busquen dentro de su corazón la razón que les afecta y traten de corregirla, recuerden que con entereza, valor y decisión todo se puede lograr en esta vida, y que todo tiene remedio, excepto la muerte.

Los quiere por siempre su amiga Lebasi.

Índice	
Agradecimientos	ii
Índice de Figuras	iv
Índice de Tablas	v
Introducción	1
Justificación	3
Objetivos	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Hipótesis de trabajo	5
Antecedentes	6
Capítulo I. Estado del arte	9
1.1 Preámbulo	9
1.2 Evolución de la cal	11
1.3 Propiedades físico-químicas de la cal	16
1.4 Algunos de los usos de la cal para la construcción	22
Capítulo II. Microscopía Electrónica de Barrido	26
2.1 Introducción a la microscopía electrónica de barrido	26
2.2 Resolución	29
2.3 Naturaleza de las ondas de electrones	29
2.4 Interacción haz incidente - muestra en el MEB	31
Capítulo III. Materiales y Métodos	33
3.1 Materiales	33
3.2 Elaboración de morteros	34
3.3 Métodos	37
Capítulo IV. Resultados y discusión	45
Conclusiones	61
Referencias	63
ANEXOS	65

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Banco de piedra caliza en las cercanías de Bernal, Querétaro.</i>	11
<i>Figura 2. Preparación de los moldes para mortero.</i>	34
<i>Figura 3. Preparación del mortero.</i>	35
<i>Figura 4. Llenado de los moldes para mortero.</i>	35
<i>Figura 5. Lote de probetas de mortero.</i>	36
<i>Figura 6. Ensaye a compresión de probeta de mortero.</i>	36
<i>Figura 7. Identificación de muestras.</i>	37
<i>Figura 8. Porta-muestras.</i>	38
<i>Figura 9. Preparación del porta-muestras.</i>	38
<i>Figura 10. Limpieza de porta-muestras.</i>	39
<i>Figura 11. Sujeción de la muestra al porta-muestras.</i>	39
<i>Figura 12. Colocación de la muestra.</i>	40
<i>Figura 13. Recubrimiento de las muestras.</i>	40
<i>Figura 14. Montaje del porta-muestras en el MEB.</i>	41
<i>Figura 15. Montaje del portamuestras.</i>	42
<i>Figura 16. Microscopio electrónico de barrido.</i>	43
<i>Figura 17. Pantalla de imágenes (MEB); pantalla para análisis semi-cuantitativos (EDS).</i>	43
<i>Figura 18. Vista general del equipo de microscopía electrónica de barrido.</i>	44
<i>Figura 19. Microfotografía de puzolana "Fly Ash" a 1000X.</i>	45
<i>Figura 20. Microfotografía de puzolana "Fly Ash" a 5000X</i>	45
<i>Figura 21. Microfotografía de puzolana "Reolita" a 5000X .</i>	46
<i>Figura 22. Microfotografía de puzolana "Reolita" a 500X.</i>	46
<i>Figura 23. Microfotografía de puzolana "Caolín" a 500X.</i>	47
<i>Figura 24. Microfotografía de puzolana "Caolín" a 5000X.</i>	47
<i>Figura 25. Microfotografía de puzolana "Tepojal" a 500X.</i>	48
<i>Figura 26. Microfotografía de puzolana "Tepojal" a 1000X.</i>	48
<i>Figura 27. Microfotografía de puzolana "Tepojal" a 1000X.</i>	49
<i>Figura 28. Microfotografía de puzolana "Tizate" a 1000X.</i>	49
<i>Figura 29. Microfotografía de puzolana "Tizate" a 5000X.</i>	50
<i>Figura 30. Microfotografía de óxido de calcio "SA2" a 5000X.</i>	50
<i>Figura 31. Microfotografía de hidróxido de calcio "SA3" a 5000X.</i>	51
<i>Figura 32. Microfotografía de calcita "SA1" a 20,000X.</i>	51
<i>Figura 33. Microfotografía de arena ensacada a 500X.</i>	52
<i>Figura 34. Microfotografía de arena sílica de Ottawa "C778" a 500X.</i>	53
<i>Figura 35. Microfotografía de arena sílica de Ottawa "C778" a 100X.</i>	53
<i>Figura 36. Microfotografía de Mortero a base de cal, arena, agua y puzolana "E" a 500X.</i>	54
<i>Figura 37. Microfotografía de Mortero a base de cal, arena, agua y puzolana "E" a 500X.</i>	55
<i>Figura 38. Microfotografía de Mortero a base de cal, arena, agua y puzolana "E" a 5000X.</i>	56
<i>Figura 39. Resistencia a la compresión de morteros con diferentes proporciones de puzolana</i>	79
<i>Figura 40. Mortero de cal-arena de Ottawa al aire libre.</i>	84
<i>Figura 41. Ensayes de morteros a base de arena de mina, cal y puzolana en diferentes proporciones, con curado en cuarto húmedo y al aire libre.</i>	89

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Descripción de las muestras de carbonato, óxido e hidróxido de calcio.</i>	14
<i>Tabla 2. Análisis semi-cuantitativo por EDS de "Arena Ensacada".</i>	52
<i>Tabla 3. Análisis semi-cuantitativo por EDS de "Arena sílica de Ottawa (C778)"</i>	54
<i>Tabla 4. Análisis semi-cuantitativo por EDS de "mortero ensayado a base de cal, puzolana, agua y arena"</i>	56
<i>Tabla 5. Resultados de ensayos de compresión de morteros en diferente proporción, porcentaje y a distinto número de días.</i>	65
<i>Tabla 6. Mezcla: Relación 1:3 cal San Antonio/arena de mina 100% <#8; finos <0.5%</i>	74
<i>Tabla 7. Mezcla: Relación 1:2.5 cal San Antonio/arena de Ottawa C 778</i>	80
<i>Tabla 8. Mezcla: Relación 1:2.5 cal San Antonio/arena de río</i>	86

Introducción

La cal es el término con el que se designa a la cal viva o hidratada con pocas impurezas y conteniendo un alto grado de reactividad, lo que la hace apropiada para el proceso químico. Comercialmente la cal química se obtiene por medio de la calcinación controlada de piedra caliza de alta calidad. La cal viva, que es el producto de la calcinación, consiste en óxido de calcio y hay tres formas de obtenerla:

Cal viva con un alto contenido de calcio- Generalmente contiene de 0.5 a 2.5% de óxido de magnesio.

Cal viva dolomítica- Generalmente contiene de 35 a 40% de óxido de magnesio.

Cal viva magnesiana- Generalmente contiene de 5 a 10% de óxido de magnesio.

La cal hidratada comercial es un polvo seco que se obtiene por medio de tratamiento de la cal viva con suficiente agua, hasta satisfacer su afinidad química por el agua, y de esta manera convertir los óxidos en hidróxidos. Dependiendo del tipo de cal viva que se use y las condiciones de hidratación que se empleen, la cantidad de agua en combinación química varía de la siguiente manera:

Cal hidratada con alto contenido de calcio: La cal viva con alto contenido de calcio produce una cal hidratada, que contiene generalmente entre un 72 a 74% de óxido de calcio, y de 23 a 24% de agua.

Cal hidratada dolomítica (normal): Bajo condiciones de hidratación atmosférica tan sólo se hidrata la fracción de cal viva dolomítica, produciendo una cal hidratada con la siguiente composición química: 46 a 48% de óxido de calcio, 33 a 34% de óxido de magnesio, y de 15 a 17% de agua.

Cal hidratada dolomítica (presión): Esta cal se produce de la cal viva dolomítica bajo presión, lo que da como resultado la hidratación de casi todo el óxido de magnesio así como todo el óxido de calcio, dando como resultado la siguiente

composición química: 40 a 42% de óxido de calcio, 29 a 30% de óxido de magnesio y 25 a 27% de agua.

La cal química es un sólido blanco con estructura cristalina. La cal viva es sumamente reactiva con el agua, ya que genera un calor muy elevado en el proceso de hidratación. Este material reaccionará con la humedad del aire, y como tal se le ha encontrado el uso de secante. Cuando existe humedad, la cal reacciona lentamente con el dióxido de carbono del aire, formando carbonatos insolubles al agua. Por tratarse de un material químicamente activo, es recomendable que se reduzca al mínimo su exposición al medio ambiente durante su manejo y almacenamiento. La cal hidratada, a pesar de que solo puede disolverse ligeramente con el agua, forma fácilmente suspensiones. La solución y suspensión resultante es altamente alcalina, con un pH de 12.4.

La cal viva se puede adquirir comercialmente por medio de furgones cargados, a granel o en bolsas de papel, y en tamaños más o menos estándar, como sigue:

Cal viva como sale del horno: Con un tamaño máximo de 8 pulgadas de diámetro.

Cal triturada o en módulos: En tamaños que oscilan entre 2 ½ a ¾ de pulgada.

Cal molida: Producto que resulta al moler el material de mayor tamaño. Un tamaño típico es cuando todo el material pasa sustancialmente por una malla No. 8 y del 40 al 60% por una malla No. 100.

Cal pulverizada: Nódulos o pelets de una pulgada, molidos a la finura de la cal. Generalmente la cal hidratada se embarca en bolsas de papel de 25 kg, y a granel, en carros de ferrocarril y en camiones-tanque. Debido al proceso de hidratación, la cal hidratada tiene un tamaño de partículas finas, y los niveles de hidratación apropiados para la mayoría de los procesos químicos, deben de pasar en un 85% o más, por malla 200, mientras que para aplicaciones especiales, la cal hidratada clasificada por aire puede obtenerse tan fina como para que el 99.5% pase por una malla 325.

Justificación

Para que los avances en la construcción sean cada vez mayores es necesario que los materiales que se van a utilizar nos brinden mejores características y sean adquiridos con mayor facilidad por la sociedad, es necesario ya que la tecnología crece rápidamente que no se nos olvide que el construir también es importante.

Con este fin, y valiéndonos de la tecnología que tenemos a nuestro alcance, se caracterizarán tanto la arena, que es el material base para la fabricación de morteros que haremos, y los materiales secundarios que utilizaremos, arenas y puzolanas, con el objetivo de ver las características que tienen y conseguir mejores resultados que los que se han logrado en la actualidad.

Es importante no olvidar que la cal es un material que fue utilizado en grandes estructuras que tienen historia en este siglo; por la duración de las mismas y aún incógnita de todos los materiales que llevan, aunque es seguro que la cal fue utilizada en grandes cantidades. Aún preguntaría entonces por qué no aprovecharla. El siguiente trabajo se hará con la finalidad de mejorar la cal aplicada con puzolana.

Objetivos

Objetivo general

Caracterizar morteros a base de cal, puzolanas y arenas a través del microscopio electrónico de barrido para construcción, en un marco de desarrollo sustentable, sirviéndonos estos resultados para saber que material tiene las mejores características y cual de ellos sería más apto para determinada construcción, y con ello saber que mezcla de materiales traería mejores resultados al hacer los ensayos a compresión de los morteros, para comparar la resistencia tanto a 7, 14, 28, 45 y 60 días respectivamente y habiendo estado estos en cuarto húmedo y al aire libre.

Objetivos específicos

Crear una nueva cal hidráulica con mayor resistencia, que contribuya a una mejor calidad en la edificación de construcciones, así como también generar un menor costo a la adquisición del producto, facilitando así el uso del mismo material.

Caracterizar una nueva cal hidráulica para construcción con propiedades mecánicas superiores a los productos a base de cal aérea, reduciendo el costo de producción y la generación de gases de efecto invernadero.

Hipótesis de trabajo

El uso de puzolanas contribuye a optimizar las propiedades mecánicas y la durabilidad de los morteros para construcción basados en cal, mejorando su perfil ambiental y reduciendo el costo de fabricación.

Antecedentes

El mundo fue construido con cal; la importancia histórica de la cal en la construcción se encuentra ampliamente documentada. Los morteros de cal fueron utilizados en muchas de las grandes estructuras por civilizaciones más tempranas, pero los romanos fueron los primeros en usarlos ampliamente en edificación, desarrollando métodos de fabricación en general con base en cementante natural de cal y estableciendo técnicas de construcción apropiadas (Delatte, 2001).

Los más antiguos y conocidos datos de la utilización de la cal y sus derivados son los de la cultura de Anatolia en la actual Turquía, en Catal Hüyük (6000 a. C.), donde las viviendas de la ciudad estaban provistas de dos niveles, el más bajo dotado de pilares de madera recubiertos con una mezcla de cal pintada de rojo y de igual manera el piso. Las paredes se cubrían con frescos de dibujos esquemáticos de animales; incluso hay la representación de una ciudad con un volcán al fondo.

En Mesopotamia fue descubierto un horno de cal de aproximadamente 2500 a. C.; en esa área son constantes los descubrimientos de su utilización, como el palacio asirio de Til Barsib (TelAhmar), del siglo XVIII a. C., con el fresco que desarrolla una audiencia del rey Figlatpileser III con un friso de escribas, sirvientes y prisioneros. Las pinturas murales de Mari (siglo-XVIII a. C.), en Louvre, fueron pintadas sobre una capa de yeso al temple. En la ciudad caldea de Ur, patria de Abraham, sus paredes se revocaron con cal.

La cultura maya utilizó la cal en los centros ceremoniales como Copán, Palenque, y Chichén Itzá, estucando y tiñendo las decoraciones esculpidas; el modo de fabricar cal en el mundo maya es sobresaliente: la transformación de las calizas en una pasta untuosa, adhesiva y con gran resistencia mecánica, aún en condiciones de alta humedad relativa y alta temperatura, no es fácil.

Sin embargo, es gracias a esta invención tecnológica que los constructores mayas edificaron sus grandes centros ceremoniales y urbanos, utilizando mezclas de cal para pegar piedra con piedra, y que los artistas realizaron relieves en estuco utilizando la cal como materia prima para el modelado; también elaboraron pinturas murales en el interior y exterior de los edificios, utilizando soportes de cal y un aglutinante orgánico que se diluye en agua de cal. La cal fue no sólo un cementante de alta calidad que ha sobrevivido en la selva durante más de 1500 años, sino la base de la química cotidiana del mundo maya. Los antiguos pobladores de la región conocieron bien los efectos que las soluciones alcalinas tienen sobre ciertos materiales orgánicos a base de polisacáridos y celulosa. Las propiedades de esta pasta de cal maya son excelentes: posee adhesividad, plasticidad y alta resistencia mecánica; ha probado su calidad al sobrevivir en un contexto climático particularmente difícil.

Los toltecas utilizaron la cal en Tula, así como también los aztecas.

En las culturas andinas del Perú se usó la cal antes de la colonización española, en coloraciones de frescos y otros temas. También se empleó la cal para las argamasas de mampostería y se mezclaba con el barro, estabilizando adobes. El ejército de figuras de terracota de tamaño natural que apareció al excavar la gran tumba imperial de la dinastía Qin (246 a. C.) fue policromado con cal pigmentada.

Hasta la revolución industrial y el descubrimiento del cemento en 1824 en Pórtland, Inglaterra, la cal fue el principal cementante para la construcción, usada como argamasa en una mezcla con arena y agua, así como en revestimientos y pinturas. Con cal se edificaron obras célebres, que impresionan por su resistencia no obstante el paso del tiempo, por ejemplo: las Pirámides de Egipto, la Muralla China, el Coliseo Romano, y la Vía Apia, entre otras; en Mesoamérica, la cal fue ampliamente utilizada por las culturas precolombinas, así como en la construcción de templos y palacios coloniales, que han resistido los embates del intemperismo y la fuerza de la naturaleza.

En el siglo XVIII, los trabajos de Smeaton condujeron al conocimiento científico sobre las propiedades de la cal hidráulica, lo que derivó en la tecnología y la patente del cemento Pórtland (Cowper, 1927). Desde el siglo XIX hasta hoy, la aparición del cemento Portland ordinario (CPO) produjo un decrecimiento importante en el uso de la cal en la construcción porque el CPO brinda un fraguado inicial más rápido y mayor resistencia a edades tempranas (Hill, Holmes and Mather, 1992). Aunque estas no son las únicas características deseables en un cementante, muchos beneficios pueden derivarse del retorno al uso apropiado de cal en la industria de la construcción, entre otros: su producción requiere temperaturas inferiores a la del CPO y menos energía durante su calcinación implica menor emisión de gases de efecto invernadero; mínima contracción, lo que evita agrietamientos; los morteros de cal resisten algún grado de acomodamiento en la mampostería, mientras los basados en CPO carecen de tolerancia a los movimientos; el deterioro causado por los álcalis contenidos en el CPO y que no presentan este problema en los morteros de cal; menor conductividad térmica que hace a las habitaciones más confortables; mayor impermeabilidad, y mejor adherencia para materiales de mampostería comparado con productos basados en CPO (Shi, 2001).

Capítulo I. Estado del arte

1.1 Preámbulo

Los morteros de cal son materiales dinámicos, continúan interactuando con el ambiente después de endurecer durante el proceso de carbonatación y se adaptan a los cambios en las estructuras (Holmes and Wingate, 2003). El endurecimiento por carbonatación se produce cuando el contenido de humedad ha disminuido lo suficiente y la cal (Ca(OH)_2) reacciona con el CO_2 del aire formando CaCO_3 . Este proceso no puede realizarse bajo el agua; el fraguado ocurre lentamente desde el exterior hacia el interior del mortero. Las diferencias crecientes de los precios del combustóleo y otros combustibles usados por los fabricantes de cal son afectados directamente por el mercado internacional del petróleo, que contribuye a una mayor incertidumbre y volatilidad en los precios; de acuerdo con datos de la Asociación Nacional de Fabricantes de Cal (ANFACAL, 2007) la producción anual nacional de cal es de 6'500,000 de toneladas, mientras que el mercado demanda 4'000,000 de toneladas; esta industria mexicana vive una crisis propiciada por un mercado ofertado y costos crecientes, y requiere de cambios para su supervivencia; el incremento de calidad y la diversificación de productos con valor agregado a partir de cal como materia prima significan opciones para la viabilidad de empresas y empleos en México; el presente estudio es un punto de partida para el mejoramiento de la cal para su uso en la construcción. Se desarrollará microscopía electrónica de barrido SEM y EDS, (se explican las pruebas de ellos en la página 31), con la finalidad de caracterizar los materiales y mejorar una nueva cal con puzolana. La piedra caliza (CaCO_3) constituye en su estado natural el punto de partida obligado para la producción de la cal. Una vez extraída, se lleva a una instalación de trituración primaria donde se reduce hasta un tamaño máximo de entre 80 y 200 mm. La obtención de una u otras granulometrías varía en función del tipo y diseño del horno empleado (verticales, horizontales, y rotativos). En la siguiente etapa la materia prima es

calcinada a una temperatura entre 900 y 71200°C y luego, mediante transportes adecuados, la cal viva obtenida se lleva a silos de almacenamiento, desde donde puede ser distribuida en sacos o a granel. Otra etapa del proceso es la producción de cal hidratada o apagada; la cal viva se lleva al hidratador, donde se mezcla con la cantidad adecuada de agua para satisfacer su afinidad higroscópica. El ciclo se cierra con la carbonatación, reacción del hidróxido de calcio con el dióxido de carbono del aire, con lo que regresa a un estado análogo al punto de partida, como CaCO_3 . En la actualidad existen varias marcas de cal comercial para la construcción que provienen de diferentes canteras, lo que las hace diferentes. La cal de los productores mexicanos afiliados a la Asociación Nacional de Fabricantes de Cal (ANFACAL), está regulada por la Norma Mexicana NMX-C-003-ONNCCE-1996, que establece que la cal hidratada para la construcción se clasifica en cuanto a su composición química en tipo único y en un mismo grado de calidad, con un contenido mínimo de 80% en la suma de $\text{CaO} + \text{MgO}$ en base no volátil, y un máximo de 5% de MgO . Las marcas comerciales más populares en México son regularmente las disponibles en cada región, pero sobresalen: El Tigre, Calfina, Perla, Incalpa, Cobra, Muro, Huescalapa, Santa Fe, Polar, Noroeste, Santa Emilia, Banderilla, Nachón, Teziutecas, Santa Cruz, Calizas Universales, Tehuacán, Maria Luisa, Santa María, Gloria, Guadalajara, Hidracán, San Lorenzo, Tirado, Nay, Colimán, Pet-Cal, Petrocal, El Piñón, Torreón, Chiapas, Panini, El Refugio, Oax, Santa Lucía, Aguascalientes, San Martín, Azteca, La Tehuana, Calfin, Calfort, Los Arcos, Maciel, Teloloapan, Zapotiltic, Calteco, Diamante, San Antonio, Carlan, Duracal, Titán, Mitza, BYM, Balún Canán, Del Valle, Calidra, Porter, Marfil, Suprema, Toluca, Valasa, Tobora, Edifical, Tepeyahualco, Topo, Calhifornia, Icor, y otras; diseminadas en el territorio mexicano incluidos algunos estados no productores (Chihuahua, Durango, Tlaxcala, y Nayarit), han sido indistintamente empleadas con resultados satisfactorios.

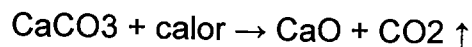
1.2 Evolución de la cal

La piedra caliza (figura 1) es un mineral inerte con alto contenido de carbonato de calcio, originado casi siempre en ambientes marinos por acciones químicas y bioquímicas. La cal es un producto químico que resulta de la calcinación de piedra caliza, proceso del que se obtiene óxido de calcio, que después de apagarse con agua se convierte en hidróxido de calcio y éste se puede utilizar en diversas aplicaciones en las industrias de la construcción, agrícola y alimentaria, así como en tratamientos ambientales, entre otras. El calcio ocupa el quinto lugar en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre, pero no se encuentra en estado puro en la naturaleza.



Figura 1. Banco de piedra caliza en las cercanías de Bernal, Querétaro.

Las reacciones químicas involucradas en la formación de óxido de calcio son aparentemente simples, encubriendo el proceso involucrado en fabricar el producto; el óxido de calcio es obtenido de la piedra caliza calentada en un horno; la reacción química para este proceso, denominada calcinación, es:



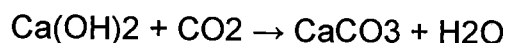
La temperatura óptima requerida para que esta disociación tenga lugar es de 898° C a 1 atmósfera de presión. Si no se alcanza la temperatura de disociación, entonces la cal es subcalcinada y quedan residuos de carbonato no reactivo. Si la cal es sobrecalcinada y la temperatura de disociación es excedida, la cal reduce su reactividad. A temperatura excesivamente alta, la cal se vuelve inerte. El valor del calor de formación para óxido de calcio generalmente aceptado es

151,900 cal/mol.

El óxido de calcio es transformado en hidróxido de calcio por la adición de agua; el óxido de calcio es muy reactivo cuando se pone en contacto con el agua en un proceso denominado hidratación; generalmente el óxido de calcio es agregado al agua y no al contrario, debido a la violencia de la reacción exotérmica. La reacción química para este proceso es:



El hidróxido de calcio se transforma durante el fraguado, cuando es expuesto al bióxido de carbono del aire, en el compuesto de partida del proceso: carbonato de calcio, produciendo una piedra caliza sintética recristalizada:



Esta reacción, denominada carbonatado, puede ser un lento proceso; cuando seca inicialmente, forma una película débil. El carbonato de calcio resultante, que conserva una composición idéntica a la de la calcita natural, desarrolla sin embargo una estructura no presente en la naturaleza; esto es evidente sólo cuando las dos sustancias son comparadas en un Microscopio Electrónico de

Barrido (SEM por Scanning Electron Microscope). La calcita natural se presenta en una variedad de estructuras cristalinas, mientras que la argamasa que se produce con hidróxido de calcio al fraguar como carbonato de calcio, contiene esférulas de un diámetro menor a $1\mu\text{m}$.

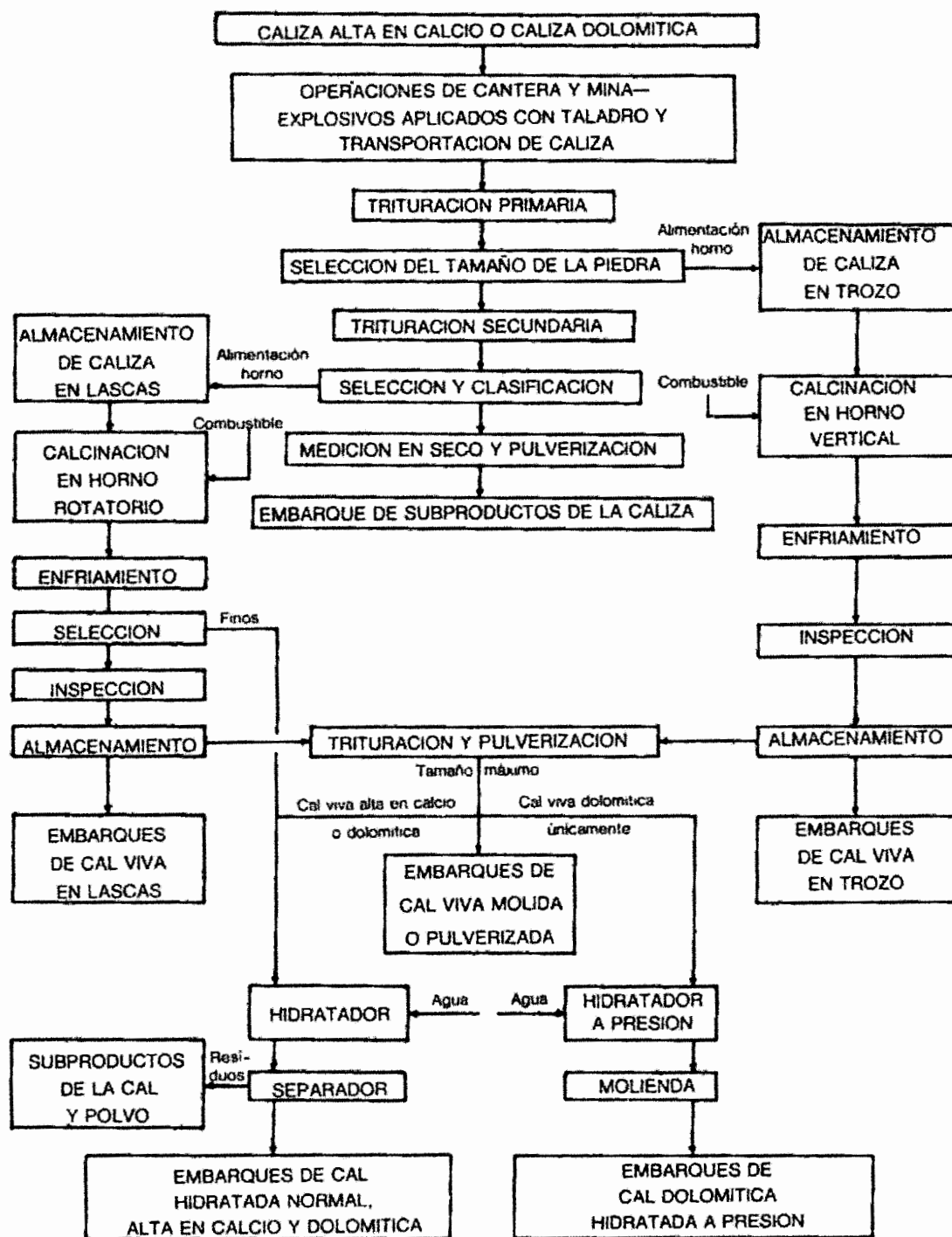
Este polimorfo de calcita tiene propiedades ópticas similares a una variedad cristalina de calcita conocido como micrita, y es a menudo indistinguible de la micrita natural cuando es observada en un microscopio binocular.

En la Tabla 1 se presentan las muestras: SA1 original de calcita proveniente de la cantera, SA2 transformada en óxido de calcio mediante el proceso de calcinación, y finalmente SA3 muestra de hidróxido de calcio, esta última es la que manejaremos para hacer nuestras mezclas.

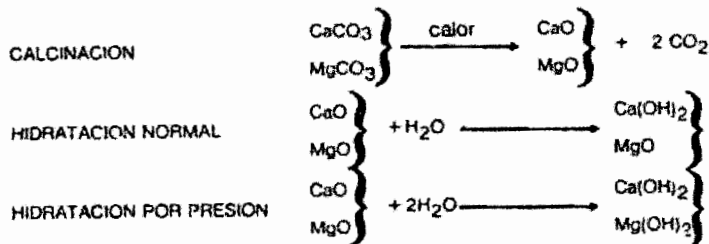
Tabla 1. Descripción de las muestras de carbonato, óxido e hidróxido de calcio.

Muestra	Origen	Descripción	Coloración	Forma
SA1	Banco único de piedra caliza de Cal San Antonio en Tolimán, Qro. (en la vecindad de Bernal)	Piedra caliza cruda triturada y cribada, representativa de la producción de la fecha de muestreo en el banco único.	Grisácea	Roca dura
SA2	Banda transportadora de salida del horno de Cal San Antonio en Tolimán, Qro.	Cal viva recién calcinada, representativa de la producción en la fecha de muestreo.	Blanquecina ligeramente amarillenta	Terrones blandos
SA3	Almacén de producto comercial a granel previo a su embolsado, Cal San Antonio en Tolimán, Qro.	Cal hidratada representativa de la producción en la fecha de muestreo.	Blanca	Polvo fino

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FABRICACION DE CAL



REACCIONES QUIMICAS



1.3 Propiedades físico-químicas de la cal

Cal química es una expresión con la que usualmente se denomina al óxido de calcio o al hidróxido de calcio con escasas impurezas y elevada reactividad, lo que la hace adecuada para su aplicación en procesos químicos; en la práctica, la cal química se obtiene con la calcinación controlada de piedra caliza de alto contenido de carbonato de calcio y muy bajo contenido de impurezas: toma forma como un sólido blanquecino con estructura cristalina. El óxido de calcio es muy reactivo con el agua y genera una reacción exotérmica durante la hidratación, mientras que el hidróxido de calcio reacciona lentamente con el bióxido de carbono del aire, formando carbonatos insolubles en agua. Por tratarse de materiales químicamente activos, es recomendable que durante su manejo y almacenamiento se minimice su exposición al ambiente; no obstante que el hidróxido de calcio sólo es ligeramente soluble en agua, forma solución y suspensión altamente alcalinas, con un pH de hasta 12.4 casi inmediatamente después de mezclarlo. El proceso exotérmico durante la hidratación del óxido de calcio resulta en el 85% de partículas de tamaño menor a 75 μm (malla 200), es decir, un alto contenido de finos.

El óxido de calcio es poco soluble en agua, disminuyendo la solubilidad al aumentar la temperatura (tabla 1); la disolución se llama agua de cal, mientras que una suspensión de hidróxido de calcio en agua se llama lechada de cal. La solubilidad de la cal comercial en agua no varía más que 7% respecto de la solubilidad del hidróxido de calcio puro; las diferencias posiblemente se originan por la presencia de rastros de hidróxidos de sodio y de potasio en las cales comerciales; la presencia de óxido de magnesio, sílice, y carbonato, no tiene efecto sobre la solubilidad de la cal ordinaria, pero sí puede afectar el tipo de solución.

Solubilidad de la cal en agua

La evaluación de la piedra caliza debe incluir la determinación de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Las calizas rara vez son monominerales de forma natural, por lo que una clasificación de esta roca debe tomar en cuenta la variación en cantidad de calcita, dolomita, y materiales no carbonosos.

Cal pura

Nombre químico

Óxido de Calcio

Óxido de Magnesio

Hidróxido de Calcio

Hidróxido de Magnesio

Fórmula química CaO MgO Ca(OH)₂ Mg(OH)₂

Peso molecular 56.08 40.32 74.096 58.336

Punto de fusión 2570°C 2800°C

Punto de descomposición 580°C 345°C

Punto de ebullición 2850°C 3600°C

Índice de refracción 1.838 1.736 1.574 y 1.545 1.559 y 1.580

Calor de disolución a

18°C +18.33 kg-cal +2.79 kg-cal -0.0 kg-cal

Forma cristalina cúbica cúbica hexagonal hexagonal

Densidad 3.40 3.65 2.343 2.40

Propiedades físicas y mecánicas

- Densidad
- Finura
- Comportamiento hídrico: absorción, permeabilidad, transpiración.
- Proceso de fraguado: cambios de volumen
- Plasticidad y docilidad
- Resistencias mecánicas
- Relación propiedades/agua de amasado.
- Dureza
- Térmicas
- Químicas

Principales beneficios de la cal en los morteros

Mejora la trabajabilidad, aumenta la plasticidad de la masa incrementa la inercia térmica mejora la hidratación de los cementos.

Enfoscado

Capa de mortero que se coloca sobre el paramento con el fin de regularizar la superficie y protegerlo. En definitiva es la primera capa de recubrimiento que se coloca sobre el soporte.

Espesor variable pudiendo alcanzar 2-3 cm. con mayor espesor se corre el riesgo de caída.

Características del mortero: mayor contenido de conglomerante y el tamaño máximo de la arena puede ser de 4 mm.

Técnicas de aplicación: lanzando el mortero con la paleta o palaustre, o proyectando. Se trata de conseguir una buena adherencia al soporte y una superficie rugosa que fije la capa de revoco. No se recomienda la colocación con llana.

Revoque o revoco:

Se denomina a la capa de terminación o segunda capa que va sobre el enfoscado.

Espesor inferior a 1 cm. arena de tamaño inferior 2-3mm

Técnica: se coloca sobre el enfoscado ya endurecido.

El tiempo de colocación depende del conglomerante, si es cemento será rápido (2-3 horas) y si es cal más lento (24-48 horas).

Fratasado:

Tratamiento que se da al revoco para conseguir una superficie regular, esto es plana y uniforme, para dar la terminación de pintura, estucado o esgrafiado. La técnica consiste en **presionar** el revoco con el fratás realizando movimientos circulares sobre la superficie. Con ello se consigue la formación de una película fina de pasta (arena fina más conglomerante) que mejora notablemente la impermeabilidad.

Enlucido:

El enlucido con pasta de cal era una técnica muy empleada como acabado sobre el revoque fratasado. Se realiza con paleta o llana. Se da en capas, al menos dos. Se pretende con la primera capa que la pasta penetre en el revoco, eliminando las rugosidades. La segunda capa es de terminación.

Espesor. No debe superarse 0,5 mm con las dos capas.

Lechadas:

Se denomina al agua sobrante de apagar la cal. también se denomina así a la solución de agua y cal apagada.

Morteros grasos y magros:

Los que contienen mayor contenido de cal se denominan grasos y de menor contenido magro.

Pintura a la cal o enjalbegado:

Pintura formada por cal apagada y agua que se coloca con brocha sobre el paramento en donde fragua y endurece. Se le da color con pigmentos minerales. Tiene propiedades antibacterianas.

Estuco:

Pasta coloreada hecha con cal grasa, arena de mármol blanco de granulometría fina y pigmentos que se coloca con un fin ornamental a la par que protege el paramento. En **exteriores** se emplea como conglomerante la cal, resultando la composición como la descrita anteriormente. En **interiores** puede utilizarse yeso y polvo de mármol cuando se trata de realizar relieves, arabescos, recubrir esculturas, imitar mármoles. Es conveniente que previamente se moje el soporte eliminando polvo y suciedad.

Esgrafiado

Consiste en la **superposición de capas de revoque con distinto color**, generalmente blanco, rojizo, ocre o amarillento. Una vez colocadas se elimina parte de una o más capas de acuerdo con un dibujo o diseño mediante la técnica del estarcido, con lo que resultan figuras en relieve y policromía. Esta técnica se

desarrolló principalmente en Cataluña y Segovia en nuestro país con clara influencia musulmana e italiana.

La cal es uno de los materiales más antiguos conocidos por el hombre, por ejemplo se utilizó en la construcción de las pirámides del antiguo Egipto. Antes del rápido desarrollo de la industria de procesos químicos, la cal era considerada casi por completo como un material de construcción y agricultura. A partir de 1900 se han venido usando más cantidades de cal como reactivo químico en la industria, aunque a la fecha sigue teniendo una aplicación importante como mortero, y material de fachadas y aplanados. Es usada extensamente para la estabilización de los suelos de las carreteras de alta velocidad y en la construcción de aeropuertos.

1.4 Algunos de los usos de la cal para la construcción

En la industria del acero: En el campo metalúrgico la cal "viva" usualmente en forma de lascas, encuentra sus usos más extensos como fundente en la purificación del acero, para su manufactura mediante la oxigenación básica, el factor cal por tonelada de acero en lingote promedia 180 lbs/ton. Es particularmente efectiva en remover fósforo, azufre y sílice y, en menor proporción, manganeso. Generalmente, como el contenido de fósforo del mineral de fierro aumenta, el consumo de cal viva para extraer el fósforo como fosfato de calcio de la escoria, también se incrementa en forma proporcional.

Hay un cierto uso y un nuevo potencial de aplicación tanto para la cal viva, como para la hidratada, en la producción de bolos auto fundentes de mineral de fierro concentrados. La cal es pre-mezclada con la carga de bolos antes de procesarlos en línea.

Producción de Acero: La cal tiene un sinnúmero de aplicaciones en la manufactura de productos de acero. Usualmente se usa para el alambre estirado, actuando como lubricante cuando las varillas de acero son estiradas por medios de dados en la fundición de lingotes y escorias de altos hornos, donde un revestimiento encalado sobre los moldes previene adherencias. También es empleada en la neutralización de ácido sulfúrico basado en licores de desecho, en los que las sales de fierro también son precipitadas para prevenir la contaminación de aguas. Después de un lavado con ácido, los productos de acero frecuentemente son sometidos a un baño de cal para neutralizar los últimos rastros del ácido adherido al metal.

Adicionalmente, la cal hidratada tiene un uso, si bien limitado, en dar una protección temporal a la corrosión, en forma de revestimiento encalado para

producción de acero; para neutralizar el ácido sulfúrico en las plantas embotelladoras de refrescos, facilitando la recuperación de bencol y amoníaco.

Vidrio: La cal, usualmente en forma de cal dolomítica, está clasificada en cuarto puesto, después de la arena, la ceniza de sosa y la piedra caliza, entre las principales materias primas de que se compone el vidrio. Un proporcionamiento común o carga de vidrio está compuesto por el peso de aproximadamente 70 partes de arena, 18 de ceniza de sosa y 12 partes de óxido de cal o su equivalente. Estas materias primas, sumadas a pequeñas cantidades de otros químicos que sirven para modificar las cualidades en el vidrio para propósitos especiales, son calentados a temperaturas extremadamente altas en hornos (llamados "pots"), hasta que resulta una masa derretida. El vidrio derretido es entonces moldeado, soplado o cilindrado hasta obtener las condiciones y formas deseadas.

En la producción de alfarería blanca, la cal es a veces empleada para ligara el caolín y las bolas de arcilla presentes. Asimismo, muchas fórmulas de esmalte vitrificado requiere la adición de una pequeña cantidad de cal, ya sea hidratada o viva.

Tabiques de Silicato de Calcio: Por muchos años los tabiques de silicato de calcio (arena y cal) han sido empleados comúnmente en la construcción, de la misma manera que el tabique de arcilla. Arena de alto grado, limpia, es mezclada íntimamente con un 5 a 10% de cal alta en calcio (viva o hidratada) en estado húmedo, con o sin silicato de fluor. A la revoltura plástica resultante se le da forma de tabique y se somete a una autoclave bajo presión, en una atmósfera de vapor, por 3 a 8 horas, dependiendo del grado de presión-temperatura. Bajo esas condiciones, la cal reacciona con la sílica formando un complejo de dihidro silicato de calcio, que actúa como un material cementante, proveyendo una alta

estabilidad dimensional. Las técnicas modernas mejoradas pueden desarrollar resistencias que superan a la de los productos basados en cemento Pórtland. En procesos similares también se fabrican bloques huecos para construcción de cal-arena, baldocines, tejas, y tubos. Asimismo, productos de mampostería elaborados con mezclas de cal-escorias-agregados, y combinaciones de cal con puzolanas se hacen con procesos semejantes.

Productos de concreto: Algunos fabricantes agregan de 5 a 10 por ciento de cal hidratada por volumen a la revoltura de concreto para elaborar bloques y otros productos de concreto. Los usuarios afirman que las pequeñas partículas de hidratación resultan en un densador, que el producto resiste más al agua; que debido a la mayor plasticidad de la mezcla, se producen productos de concreto más precisos en sus costados y esquinas; mejora la reflectividad, y se reducen las pérdidas por rompimientos.

Otros productos para la construcción: La cal es empleada con puzolanas o cemento Pórtland en la manufactura de productos celulares ligeros de concreto, como grandes unidades de mampostería o losas de aislamiento, que son ampliamente usadas en Europa. Las autoclaves también son usadas en su fabricación; el efecto celular de ligereza es aprovechado a través de la acción fermentante de la cal viva atacando el polvo de aluminio.

Materiales Aislantes: Algunos materiales aislantes, moldeados como unidades, contienen cal y tierra de diatomeas, o cal, sílice, y asbestos. Curando estas mezclas se forman silicatos de calcio, los cuales poseen un coeficiente de transferencia bajo en calor. En dichos productos, la cal sirve como un agente aglomerante, reaccionando químicamente con la sílica libre presente en la mezcla,

formando silicatos de calcio. La reacción cal-silica es empleada para hacer aislantes de microporos.

Pinturas de Agua: Hay muchas propiedades en las composiciones para pinturas a base de agua que están comercializándose, en las que la cal es usada integralmente en variedades y grandes proporciones en el producto terminado. Muchas pinturas de mampostería, y en menos escala, impermeabilizantes, se componen e principio de varias cantidades de cal hidratada y cemento Pórtland blanco. Asimismo, las pinturas de caseína requieren la cal para su fabricación. La cal es usada por cualquiera de las siguientes razones:

Agente Protector: Como inhibidor de herrumbres y oxidaciones, para aumentar la resistencia al fuego, y como agente impermeabilizante.

Como Pigmento.

Como Reactivo Químico: Como solvente alcalino para aglutinadores como la caseína.

Como Agente Aglomerante.

Desinfectante.

Barnices: La cal hidratada es comúnmente usada en la manufactura de barnices de óleo-resinas de varios procesos. Sirve para neutralizar el ácido en la resina y para clarificar y endurecer el barniz.

Capítulo II. Microscopia Electrónica de Barrido

2.1 Introducción a la Microscopia Electrónica de Barrido

Un Microscopio Electrónico de Barrido crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto. No es necesario cortar el objeto en capas para observarlo con un SEM, sino que puede colocarse en el microscopio con muy pocos preparativos. El SEM explora la superficie de la imagen punto por punto, al contrario que el TEM, que examina una gran parte de la muestra cada vez. Su funcionamiento se basa en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones, de forma parecida al barrido de un haz de electrones por la pantalla de una televisión. Los electrones del haz pueden dispersarse de la muestra o provocar la aparición de electrones secundarios. Los electrones perdidos y los secundarios son recogidos y contados por un dispositivo electrónico situado a los lados del espécimen. Cada punto leído de la muestra corresponde a un píxel en un monitor de televisión. Cuanto mayor sea el número de electrones contados por el dispositivo, mayor será el brillo del píxel en la pantalla. A medida que el haz de electrones barre la muestra, se presenta toda la imagen de la misma en el monitor. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos 200.000 veces o más. Este tipo de microscopio es muy útil porque, al contrario que los TEM o los microscopios ópticos, produce imágenes tridimensionales realistas de la superficie del objeto.

El SEM provee información sobre morfología y características de la superficie, mientras que con el TEM podemos observar la estructura interna y detalles estructurales.

La Microscopia Electrónica de Barrido es una profesión, y como tal, demanda un alto nivel de destreza, no sólo para preparar las muestras y alinear adecuadamente el microscopio, sino para interpretar las imágenes obtenidas.

El Microscopio Electrónico de Barrido debe estar familiarizado tanto con los principios y prácticas del microscopio, como con la teoría de la formación de la imagen en éste, pues sólo así podrá seleccionar las condiciones adecuadas para resolver un problema dado y tener, además, seguridad en sus resultados. Es decir, el microscopio electrónico de barrido es un instrumento científico. Si nos conformamos con sólo ver a través de él, éste no sería más que un aparato; pero es necesario entender lo que se ve para extraer los secretos de la naturaleza.

Un Microscopio Electrónico de Barrido cuenta con las siguientes partes:

Óptica electrónica.

Cámara de espécimen.

Circuitos de alimentación de la óptica electrónica, de generación de alto voltaje y de producción de barrido.

Detectores de electrones secundarios emitidos por la muestra, de electrones retrodispersos y otros tipos de electrones secundarios emitidos por la muestra, de electrones retrodispersos y otros tipos de detectores.

Dispositivos para observación y registro de las imágenes.

El sistema de vacío es una parte relevante del Microscopio Electrónico. Los electrones pueden ser desviados por las moléculas del aire, de forma que tiene que hacerse un vacío casi total en el interior de un microscopio de estas características. Por último, todos los microscopios electrónicos cuentan con un sistema que registra o muestra la imagen que producen los electrones.

Hay dos tipos básicos de Microscopios Electrónicos: el **Microscopio Electrónico de Transmisión** (Transmission Electron Microscope, TEM) y el **Microscopio Electrónico de Barrido** (Scanning Electron Microscope, SEM).

Comparación entre Microscopios de Luz y Electrónico

Los Microscopios de Luz y Electrónico son esencialmente, idénticos. Tanto uno como otro nos permiten amplificar aquellos objetos que son indistinguibles a nuestro ojo. La diferencia fundamental entre los dos es la fuente de iluminación. Mientras el Microscopio de Luz utiliza un haz de luz en el rango de las longitudes de onda del visible, el Microscopio Electrónico emplea un haz de electrones de muy corta longitud de onda que permite obtener una mayor resolución.

Una tabla comparativa, entre ambos microscopios se muestra a continuación. Cabe destacar que la misma, involucra características generales de los Microscopios Electrónicos y no considera las diferencias particulares entre TEM y SEM.

	MICROSCOPIO DE LUZ	MICROSCOPIO ELECTRONICO
Iluminación	Haz de luz	Haz de electrones
Longitud de onda	2000 Å - 7500 Å	0.037 Å - 0.086 Å
Lentes	Vidrio	Electromagnéticas
Medio	Atmósfera	Vacío
Resolución	2000 Å	3 Å
Magnificación	10 x - 2000 x	100 x - 450000 x
Focalización	Mecánica	Eléctrica
Contraste	Absorción - Reflexión	Scattering

2.2 Resolución

El concepto de resolución está relacionado con la capacidad de distinguir detalles finos en una imagen. En otras palabras, es la distancia mínima r_1 a la cual podemos distinguir, claramente, dos puntos como entidades separadas.

La resolución teórica del microscopio electrónico es:

$$r_1 = \frac{0.61 \cdot \lambda}{\alpha}$$

Para valores de $\lambda = 0.037 \text{ \AA}$ y $\alpha = 0.1$ radianes, la resolución nominal es 0.2 \AA .

2.3 Naturaleza de las ondas de electrones

De Broglie mostró que una partícula moviéndose a una velocidad cercana a la de la luz tenía una forma de radiación asociada con ella. Esta relación está expresada por:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

donde λ es la longitud de onda, h la constante de Plank, m la masa de la partícula y v su velocidad.

Si la partícula es un electrón y su velocidad $1/3$ de la velocidad de la luz, $\lambda = 0.05 \text{ \AA}$, que es 100.000 veces más corta que la luz verde. Por lo tanto, la resolución de un microscopio que emplee este tipo de radiación será mucho mejor que la de un Microscopio de Luz.

La naturaleza precisa de estas ondas de electrones es difícil de entender en términos de la física clásica y su descripción se hace mediante la mecánica cuántica.

Las ondas de electrones se pueden pensar como un quantum o paquete de radiación que acompaña a cada electrón en su trayectoria, es parte de él y permanece con él. Las características de estas ondas dependen de la posición exacta de un dado electrón en el espacio y en el tiempo; puede expresarse como la probabilidad de encontrar al electrón en esa posición.

Las ondas de electrones no deben confundirse con radiación electromagnética, como la que se produce cuando un haz electrónico interactúa con la materia, pierde energía y produce una radiación cuya longitud de onda pertenece al espectro electromagnético

En el Microscopio Electrónico de Barrido, el haz electrónico, atraviesa la columna y llega a la muestra. Un generador de barrido es el responsable de producir el movimiento del haz, de manera que barra la muestra punto a punto. De la interacción entre los electrones incidentes con los átomos que componen la muestra se generan señales, las cuales pueden ser captadas con detectores adecuados para cada una de ellas. El detector capta una señal y las convierte en una señal electrónica que es proyectada en un tubo de rayos catódicos (CRT).

El barrido del haz está sincronizado con el barrido del CRT y produce una relación uno a uno entre puntos de la muestra y puntos en el CRT.

Mediante el SEM se estudian:

Morfología superficial de minerales, catalizadores, etc.

Electrodepósitos.

Adherencia fibra-matriz en polímeros.

Cambios morfológicos de materiales sometidos a tratamientos químicos.

Formas de cristalización de minerales.

Control de calidad de catalizadores industriales.

Morfología superficial interna de partículas poliméricas.

Morfología de tejidos u órganos animales y vegetales.

Estudio de moléculas.

Reconocimiento de fósiles.

Mediante el **EDS** se proporcionan los elementos químicos que contenga la muestra.

2.4 Interacción haz incidente - muestra en el MEB

Naturaleza de la interacción: Cuando el haz de electrones choca contra la muestra, ocurren interacciones entre dichos electrones y los átomos que componen la muestra. De allí surgen señales tales como: electrones secundarios, electrones retrodifundidos, rayos x característicos, electrones Auger,

catodoluminiscencia. Todas estas señales se producen simultáneamente pero cada una de ellas es captada por detectores diferentes.

Uno de los detectores más comunes es el de electrones secundarios. Los mismos son emitidos desde la muestra como consecuencia de las ionizaciones surgidas de las interacciones inelásticas. Por esta razón, poseen baja energía (50 ev). Ellos brindan una imagen de la morfología superficial de la muestra.

Unidades de medida en Microscopia

La unidad que se usa en Microscopia de luz es el micrón (μ) que es la milésima parte del milímetro.

En Microscopia Electrónica la unidad más conocida es el angstrom (\AA), definido como la diez millonésima parte del milímetro. También se emplea el nanometro (nm), que es la millonésima parte del micrón.

$$1 \text{ mm} = 10^3 \mu = 10^6 \text{ nm} = 10^7 \text{\AA}$$

Así, por ejemplo, la resolución de un microscopio de luz es 0.25μ ó 2500\AA ; y la de un microscopio electrónico de 2.5\AA .

En esta tesis tan solo mostramos imágenes de Microscopia Electrónica de Barrido, de algunas arenas, (arena ensacada, arena de mina y arena silica de Ottawa), de cal, y de algunos tipos de puzolanas (fly ash, reolita, caolín, tizate y Tepojal), así como de morteros ensayados, esto con el fin de observar la estructura, tamaño, porosidad, y composición de las mismas, entre otras características, ya mencionadas antes. La mayoría de mezclas se hicieron tomando como base de puzolana (caolín), y de arena (arena silica de Ottawa).

Capítulo III. Materiales y Métodos

3.1 Materiales

- ✓ Microscopio Electrónico de Barrido, del CFATA de la UNAM.
- ✓ Porta-muestras de bronce, aluminio y carbón para montar las muestras que se analizarán en microscopia.
- ✓ Uso del laboratorio de Microscopia del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM
- ✓ Máquina universal INSTRON para los ensayos a compresión de los morteros.
- ✓ Moldes tipo ASTM en forma de cilindros y cubos para la elaboración de morteros a base de cal, puzolanas, agua y arena.
- ✓ Arenas de mina, ensacadas y de Ottawa ASTM C-778.
- ✓ Muestras de Puzolanas (Reolita, Tepojal, Tizate, Caolín, Fly-Ash)
- ✓ Cal comercial.
- ✓ Uso del equipo de laboratorio de mecánica de suelos de la Facultad de Ingeniería (mallas, probeta, pipeta, charolas (cuadradas y redondas), espátula de cuchillo y espátula, cabezal para los cilindros, varilla) así como también el espacio del mismo.
- ✓ Uso del cuarto de curado del laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería.

3.2 Elaboración de morteros

Antes de empezar con la elaboración de los morteros, los moldes se tienen que limpiar perfectamente, ajustar de la mejor manera impidiendo que el material fluya, así como también engrasar con el mismo propósito de que al desmoldar el material no se pegue, las cantidades de los materiales para cada mezcla se muestra en anexos, así como también los resultados de los ensayos.

Figura 2. Preparación de los moldes para mortero.



Después de tener las cantidades de cada material que se utilizará, se procede a hacer la mezcla, las cantidades de los materiales varían dependiendo en que proporción con respecto a la arena y la cal, y en que porcentaje con respecto de la cal y caolín se hará la mezcla.

Figura 3. Preparación del mortero.



Teniendo una mezcla completamente uniforme se hace el llenado de los moldes, sean cilindros (10 cms de alto por 5 de ancho) o cubos (5 cms de alto por 5 de ancho), se dan 10 varillazos aproximadamente a la mitad del llenado así como también 10 varillazos al completar el llenado de los moldes, con la espátula hay que procurar que la mezcla quede al ras del molde.

Figura 4. Llenado de los moldes para mortero.



Después de hacer el llenado de los moldes se deben dejar mínimo 24 horas para que reposen y se haga el desmolde, y a partir de la fecha en que se elaboro se

cuentan los 7, 14, 28, 45 o 60 días para ensayarlos, los resultados de los ensayos de morteros se muestran más adelante.

Figura 5. Lote de probetas de mortero.



Se pueden ver los moldes en llenado de algunas de los morteros que se hicieron, así como también las probetas ya desmoldados, se hicieron ensayos de los cilindros y de los cubos para comparar sus resultados con respecto a su proporción, está es la de los cilindros con respecto a los cubos de 2:1.

Figura 6. Ensayo a compresión de probeta de mortero.



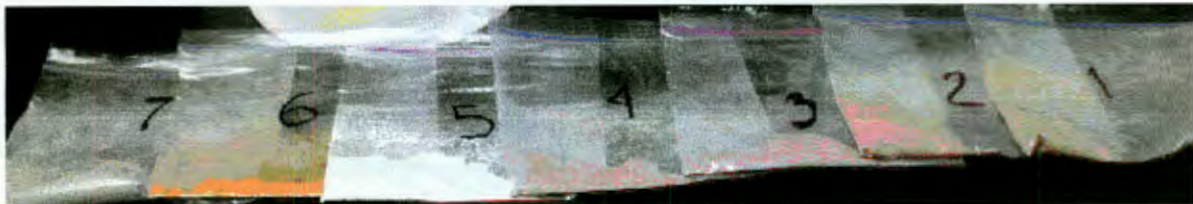
3.3 Métodos

Se observaron las muestras en un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL modelo JSM-6060LY. La superficie de cada muestra fue cuidadosamente examinada antes de que las fotografías fueran tomadas de las áreas seleccionadas como representativas. Fueron tomadas microfotografías por áreas que mostraban la morfología típica para muestras diferentes en aumentos con rangos de 20X a 100,000 X.

Modo de preparar las muestras para ser vistas en el Microscopio Electrónico de Barrido.

Antes de empezarlas a preparar debemos tener una idea de los elementos que contienen nuestras muestras, esto con el fin de saber de que material sería el portamuestras, y que este mismo no lo contenga nuestra muestra para que no se confunda en el momento del análisis; los más frecuentes son de cobre o bronce, pero si es necesario de otro material se pueden mandar hacer; las varillas deben de ser de $\frac{3}{4}$ ".

Figura 7. Identificación de muestras.



Debemos identificar con alguna clave o número todas nuestras muestras.

Figura 8. Porta-muestras.



Se debe tener una caja con tapa para guardar las muestras ya montadas y con los datos de éstas en la parte de afuera (ya existe un formato para los datos necesarios). Y Llenar la solicitud para poder hacer uso del equipo, ya sea de SEM, EDS o ambas, por cada solicitud tan solo se pueden analizar como máximo 5 muestras, por lo tanto si excedieran este número se necesitaría de más de una sesión.

Figura 9. Preparación del porta-muestras.



Después de tener listos los portamuestras estos se limpian perfectamente con grasa (brasso) y una franela.

Figura 10. Limpieza de porta-muestras.



Una vez listos los portamuestras se colocan en acetona, y durante 10 minutos se dejan en la máquina degasificadora para que se limpien totalmente, después de ello, las muestras solo se pueden montar trayendo guantes y tomando todo con pinzas, para que no se llegasen a ensuciar de nuevo.

Figura 11. Sujeción de la muestra al porta-muestras.



Lo siguiente por hacer es colocarles a cada uno de los portamuestras cinta doble cara, para pegar las muestras, esto se debe de hacer con mucho cuidado.

Figura 12. Colocación de la muestra.



Lo siguiente que se hace ahora si es montar las muestras; en un pedazo de papel se coloca la muestra que se montará y en la parte inferior del portamuestras se le pone el nombre de la muestra, se golpea tomando la muestra con las pinzas para que se le caiga el material en exceso y no haya ningún problema al analizarlo en el microscopio.

Figura 13. Recubrimiento de las muestras.



Ya montadas todas las muestras estas deben de recibir un recubrimiento de oro o de carbón dependiendo el caso, estos son 3 ciclos de 4 minutos como mínimo, si no llegarán a quedar bien recubiertas se les pueden dar más ciclos para que se puedan ver bien en el Microscopio, las muestras que no necesitan recubrimientos porque son buenos conductores, son los metales.

Enseguida se tiene que hacer la cita, y las muestras se quedan en el laboratorio después de que se hayan firmado las solicitudes como recibidas, hasta que se acabe el análisis ya las muestras se pueden recoger, mientras que las solicitudes se quedan con el encargado del laboratorio, no sin antes contestar un cuestionario de la misma que se encuentra en la parte de atrás, y el encargado del proyecto tiene que firmar de conformidad.

Modo de montar la muestra para ser vista en el Microscopio Electrónico de Barrido.

Figura 14. Montaje del porta-muestras en el MEB.



Para que las muestras sean vistas en el Microscopio se deben montar en un molde donde caben cuatro, y otro que es individual dependiendo de las que se vayan a ver en una sesión, el molde para cuatro tiene números para poder identificar cada una de las muestras que se verán en el microscopio, así mismo se deben marcar en la solicitud para no confundir los resultados.

Figura 15. Montaje del portamuestras.



Ya montadas las muestras se deben ajustar bien con un pequeño desarmador, girando los tornillos hasta que detengan las muestras para que no se salgan y no haya problema al analizarlas en el microscopio.

Por último tan solo queda ver las muestras en el Microscopio, teniendo cuidado en el manejo del mismo.

Figura 16. Microscopio Electrónico de Barrido.



Figura 17. Pantalla de imágenes (MEB); pantalla para análisis semi-cuantitativos (EDS).



Del lado izquierdo del segundo cuadro, se puede ver una imagen, esta pantalla es donde se hace en análisis de SEM, y del lado derecho se puede observar una

gráfica, está nos muestra los elementos químicos del material que se está analizando y este estudio se llama EDS.

Figura 18. Vista general del equipo de Microscopia Electrónica de Barrido.



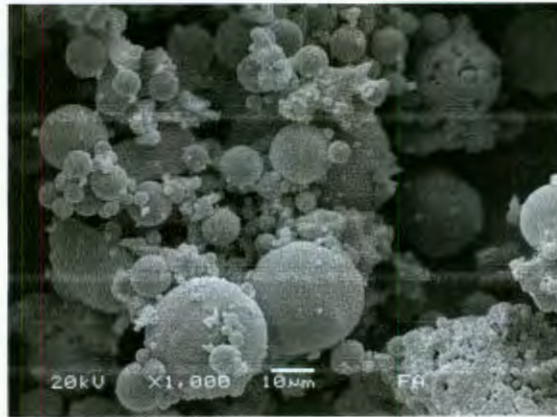
Después de terminar el análisis se tiene que llevar un CD donde nos puedan dar los resultados,

Algunos de los resultados de Microscopia Electrónica de Barrido, tanto de SEM como de EDS se muestran en el capítulo IV de resultados.

Capítulo IV. Resultados y discusión

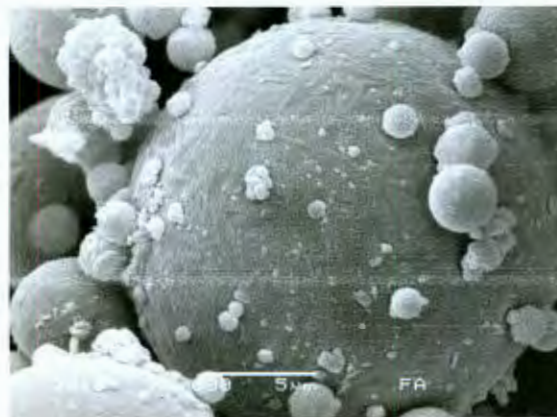
PUZOLANAS

Figura 19. Microfotografía de puzolana "Fly Ash" a 1000X.



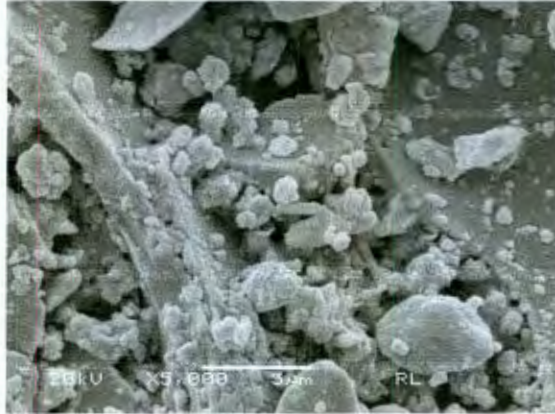
Podemos ver partículas esféricas de diferentes tamaños, lo cual puede ayudar a que la mezcla sea mas uniforme, y mas fácil de manejar, por los tamaños que presenta, es necesario para que haya mejores resultados que los tamaños no sean parecidos, con el objetivo de que los espacios sean mínimos; en este caso la barra representa un tamaño de 10 micras.

Figura 20. Microfotografía de puzolana "Fly Ash" a 5000X



En este caso la barra representa 5 micras.

Figura 21. Microfotografía de puzolana “Reolita” a 5000X .



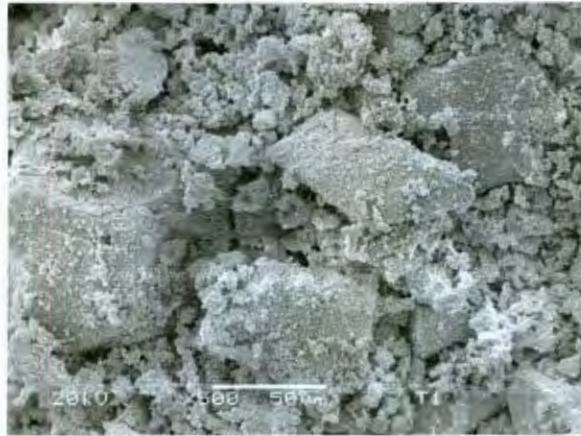
La siguiente microfotografía muestra de donde fue que se analizo este sitio, es un material que se encuentra dentro del mismo en forma de laja y dentro de ella de diferentes formas y bastantes espacios, lo que podemos ver que si el material con el que se mezcle no se adhiere como si fuese un rompecabezas, las fallas del mortero serán mayores; la barra representa un tamaño de 5 micras.

Figura 22. Microfotografía de puzolana “Reolita” a 500X.



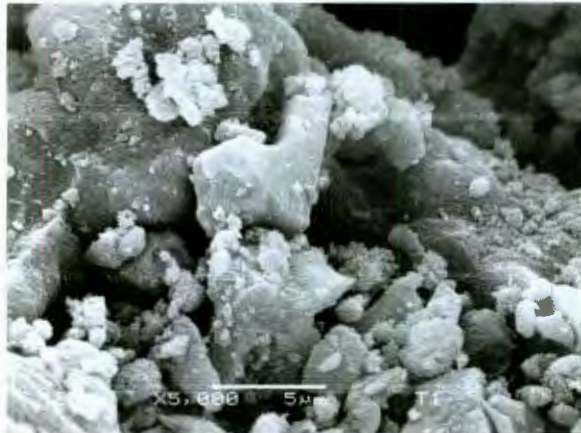
En este caso el tamaño de la barra es de 50 micras

Figura 23. Microfotografía de puzolana “Caolín” a 500X.



Se puede ver tamaños y formas diferentes, es necesario buscar materiales que se puedan adherir de la mejor manera a estas formas y tamaños, para que así, los resultados sean los esperados. La barra representa un tamaño de 50 micras.

Figura 24. Microfotografía de puzolana “Caolín” a 5000X.



La forma de esta puzolana se puede comparar con la de los cuarzos, por la manera en que se ve; a una mayor ampliación podemos ver que es un material que tiene espacios entre sí, puede ayudar a que otro material se mezcle con el, generando con ello una mejor resistencia. El tamaño de la barra es de 5 micras.

Figura 25. Microfotografía de puzolana “Tepojal” a 500X.



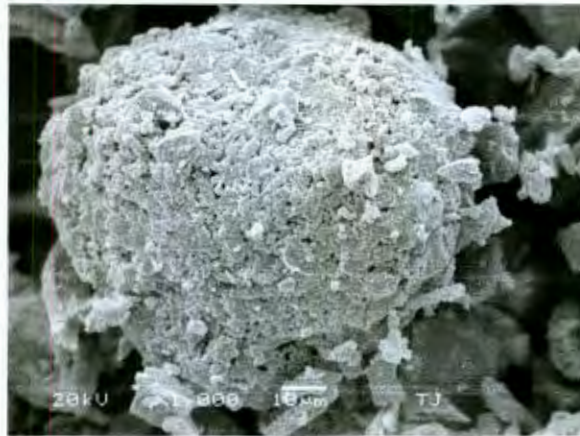
Tanto en esta microfotografía como la de abajo, se puede ver que este tipo de puzolana, tiene diferentes tamaños y formas muy variadas, con muchos espacios y orificios, si se llegase a mezclar este material con otro que no contuviera espacios similares para ser llenados mutuamente los resultados no serían satisfactorios. La barra representa un tamaño de 50 micras.

Figura 26. Microfotografía de puzolana “Tepojal” a 1000X.



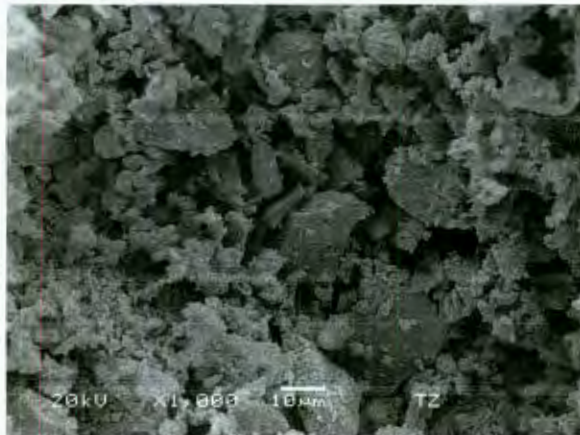
La barra representa un tamaño de 10 micras.

Figura 27. Microfotografía de puzolana “Tepojal” a 1000X.



El tamaño de las partículas es muy variado, y los espacios entre ellas son pronunciados, se puede ver que se encuentran bastante compactadas, y esta es una característica muy buena si se quiere conseguir una mejor resistencia, únicamente es necesario encontrar un material que al mezclarse con esta puzolana se adhiera, un material con medios círculos ayudaría a cubrir totalmente la forma de esfera de este. La barra es de 10 micras.

Figura 28. Microfotografía de puzolana “Tizate” a 1000X.



Material con partículas muy pequeñas y de formas parecidas, no sería complicado que otro material logrará unirlas totalmente y lograr con ello mejor resistencia. El tamaño de la barra es de 10 micras.

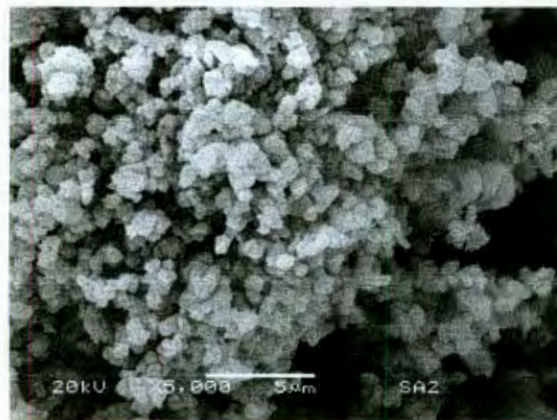
Figura 29. Microfotografía de puzolana “Tizate” a 5000X.



De la manera en que se encuentran sus partículas es sencillo unirlos con otro material para lograr una buena adherencia, resultando con ello mejor resistencia. La barra representa un tamaño de 5 micras.

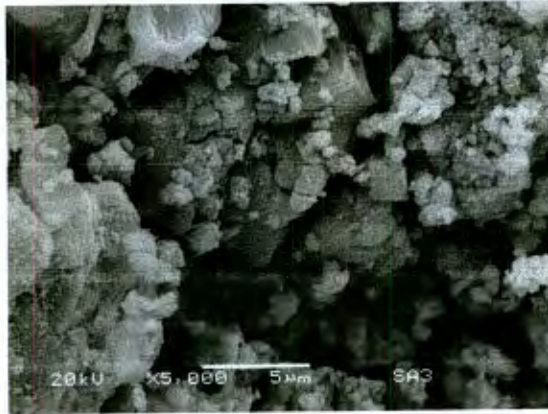
CAL

Figura 30. Microfotografía de óxido de calcio “SA2” a 5000X.



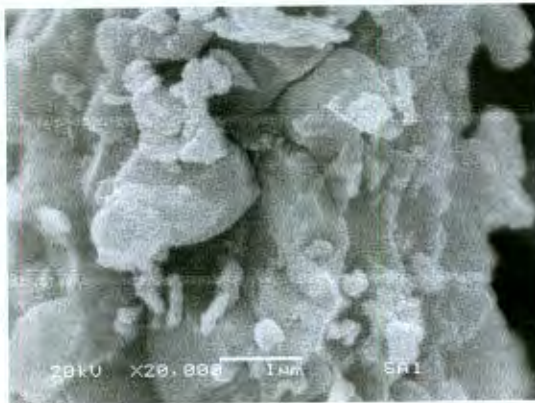
Por el pequeño tamaño de sus partículas y su forma redonda es fácil combinarla con otros materiales y lograr excelentes resultados. La barra representa un tamaño de 5 micras

Figura 31. Microfotografía de hidróxido de calcio "SA3" a 5000X.



El tamaño de las partículas ayuda a que se pueda adherir con los materiales que se mezcle. El tamaño de la barra es de 5 micras.

Figura 32. Microfotografía de calcita "SA1" a 20,000X.



Los espacios entre el material son pequeños, por lo tanto fáciles de cubrir con otros materiales y lograr los resultados esperados. El tamaño de la barra es de 1 micra.

Tabla 2. Análisis semi-cuantitativo por EDS de "Arena Ensacada".

Elemento	Peso %
O	31.61
Na	2.12
Al	13.67
Si	41.18
K	1.32
Ca	4.50
Fe	5.59
Total	100.00

ARENAS

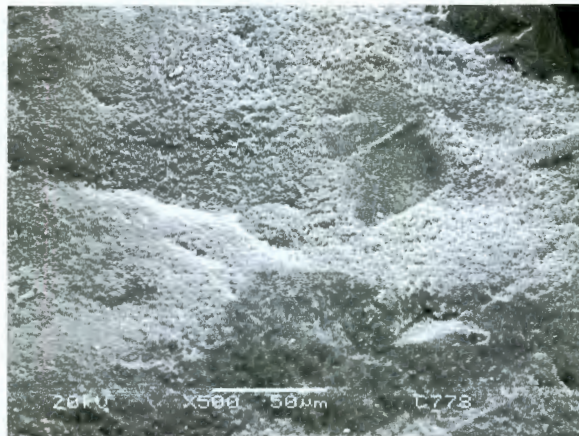
Figura 33. Microfotografía de arena ensacada a 500X.



El tamaño y los espacios entre cada una de las partículas significa que al mezclarse con un material más pequeño y compactado puede adherirse muy bien, aunque por la forma de las partículas puede ser que la mezcla no sea tan

resistente, ya que podría sufrir fracturas, porque el final de las partículas es disperejo, y puede romperse fácilmente. El tamaño de la barra es de 500 micras.

Figura 34. Microfotografía de arena sílica de Ottawa "C778" a 500X.



La unión entre las partículas de la microfotografía de abajo y está ayuda a que el material sea más resistente, el espacio y forma puede ayudar a que sin ningún problema los materiales de la mezcla se puedan adherir, logrando los resultados esperados. La barra representa un tamaño de 50 micras.

Figura 35. Microfotografía de arena sílica de Ottawa "C778" a 100X.



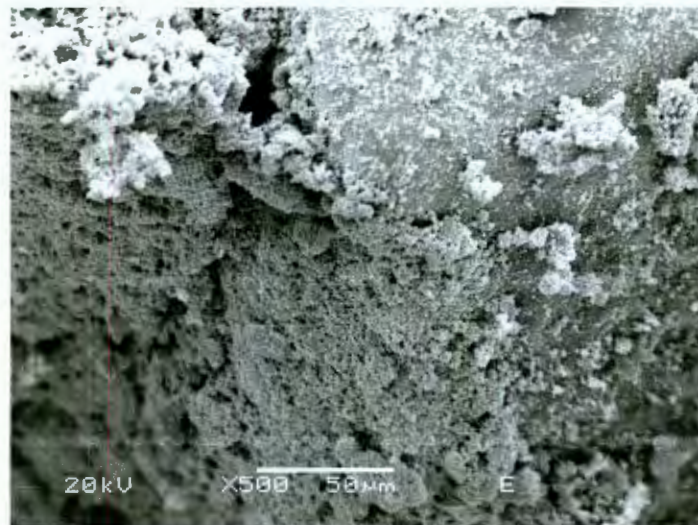
La barra es del tamaño de 100 micras.

Tabla 3. Análisis semi-cuantitativo por EDS de “Arena sílica de Ottawa (C778)”

Elemento	Peso %
C	24.57
O	24.32
Al	1.81
Si	49.29
Total	100.00

MORTEROS

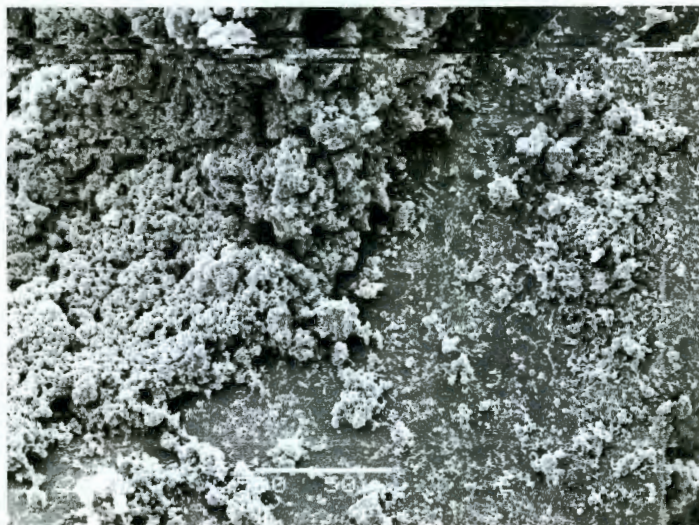
Figura 36. Microfotografía de Mortero a base de cal, arena, agua y puzolana “E” a 500X.



Después de haber ensayado el mortero se hizo un análisis en SEM, este material es de la parte de adentro de la probeta, podemos ver que los materiales que se utilizaron se adhirieron de la mejor manera, ya que los resultados anteriores que

se sacaron de ellos sirvieron para hacer un mortero con las mejores características. La barra representa un tamaño de 50 micras.

Figura 37. Microfotografía de Mortero a base de cal, arena, agua y puzolana "E" a 500X.

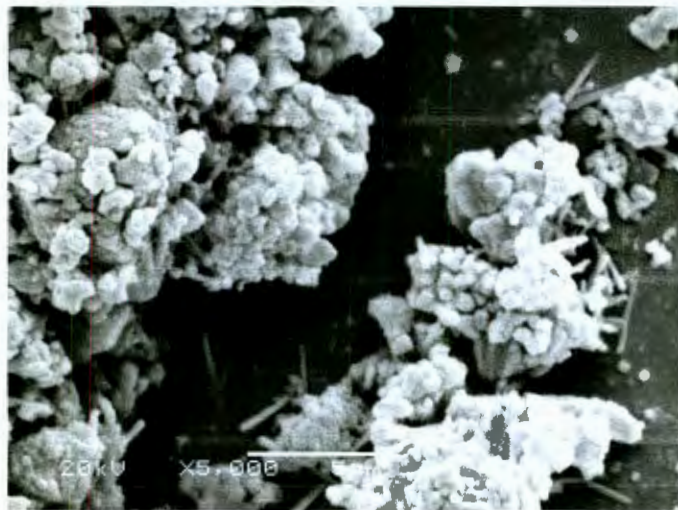


La barra representa un tamaño de 50 micras.

Tabla 4. Análisis semi-cuantitativo por EDS de “mortero ensayado a base de cal, puzolana, agua y arena”

Elemento	Peso %
C	13.21
O	43.61
Al	1.82
Si	6.65
Ca	34.71
Total	100.00

Figura 38. Microfotografía de Mortero a base de cal, arena, agua y puzolana “E” a 5000X.



Se puede ver la manera en que el mortero fallo, la carga provoco que el material se cortara como en forma de cristal, se observan pequeños pedazos como en forma de agujas, y representaría la forma de la falla que hubo. La barra representa un tamaño de 5 micras.

De la figura número 19 a la 38 se muestran 4 datos estos significan:

- 1.- La intensidad del haz (la potencia máxima que proyecta es de 30 KV).
- 2.- Ampliación.
- 3.-Tamaño de la partícula (entre mayor sea la ampliación el tamaño de la partícula es más pequeño, esta se da en micras) se representa con una pequeña barra.
- 4.- Nombre de la muestra que se esta analizando.

La velocidad máxima del microscopio electrónico de barrido es de 300,000 km/seg.

Existen tres tipos de analices para EDS que se pueden llevar a cabo en una muestra estos son:

Análisis Puntual: es aquel en donde se pueden sacar los puntos que se quieran en un una misma región de la muestra, en este tipo de análisis se muestra también la figura de la región analizada y se pueden analizar más de una región en la misma muestra.

Análisis general: este por el contrario del puntual es tan solo un punto de toda la muestra, y este tipo de análisis no muestra la figura de la muestra por lo mismo que esta indicando el análisis de toda esta y no tendría caso mostrarla.

Análisis por mapeo: en este tipo de análisis salen los elementos de diferentes colores, es como si fuera general porque no muestra diferentes puntos en una región, pero también puntual porque este sí muestra la figura.

Para que los análisis resulten, el tiempo muerto debe de estar alrededor del 10% si no, no resulta, los datos obtenidos pueden ser erróneos.

Algo muy común que puede suceder al hacer el análisis en las muestras es que estas presenten **astigmatismo** (cuando el haz no cae directamente hacia la muestra sino que está chocando contra la apertura "serie de agujeros" que se produce), y provoca que las muestras se muevan y no se puedan analizar, porque al ampliar la imagen esta se hace cada vez más brillante y no se puede observar.

Cuando se le da el recubrimiento a las muestras el equipo provoca un vacío de 1×10^{-7} .

De acuerdo a los ensayos que se hicieron los resultados fueron los siguientes:

Abreviaturas de la tabla.

Mezcla (M)

Resistencia (R)

Promedio (P)

Fraguado (F)

F	M. 1 R. P. kg/cm ²	M. 2 R. P. kg/cm ²	M. 3 R. P. kg/cm ²	M. 4 R. P. kg/cm ²	M. 5 R. P. g/cm ²	M. 6 R. P. kg/cm ²	M. 7 R. P. kg/cm ²	M. 8 R. P. kg/cm ²	M. 9 R. P. kg/cm ²	M. 10 R. P. kg/cm ²	M. 11 R. P. kg/cm ²	M. 12 R. P. kg/cm ²	M. 13 R. P. kg/cm ²
7 días	5.30	7.08	5.34	10.96	10.76	5.28	6.61	7.43	9.66	7.67	7.84	6.91	8.56
14 días	6.47	9.42	12.36	8.00	11.36	8.85	7.86	9.15	7.6	9.33	8.80	7.30	9.34
28 días	14.09	13.97	19.16	10.24	13.71	7.77	12.94	8.64	11.68	10.14	10.01	6.42	10.66
45 días	23.32	24.31	21.14			9.82	8.44	10.58	13.69	13.09	10.37	11.34	12.39
60 días	12.48	15.29	19.74	12.33	14.22								

En anexos se muestra los resultados de los ensayos así como también los materiales que se utilizaron en cada una de las mezclas realizadas.

POSIBLES APLICACIONES Y USOS DEL PROYECTO

A partir de la presente investigación serán caracterizados con Microscopia Electrónica de Barrido una serie de materiales de puzolanas y arenas para construcción basados en cal de alta calidad y durabilidad, utilizando puzolanas como adición mineral activa, lo que mejora las propiedades mecánicas, trabajabilidad (con el objetivo de tener una mezcla con las mejores características en un menor tiempo), durabilidad y acabado final de los compuestos producidos. Adicionalmente, permite disminuir significativamente el consumo de aglomerante de cal aérea mejorando su perfil ambiental. Los materiales compuestos a base de cal-puzolana representan una opción ambientalmente sustentable y económicamente atractiva.

El desarrollo de nuevos materiales para construcción basados en cal abre nuevas perspectivas a la industria nacional de fabricación de cal, diversifica el mercado y ofrece materiales apropiados para la restauración del patrimonio cultural, a la vez que disminuye significativamente el impacto ambiental del uso de la cal para construcción.

Conclusiones

Fue desarrollada una metodología y la metrología de caracterización para muestras de carbonato, óxido e hidróxido de calcio, microscopía electrónica de barrido; tanto SEM como EDS.

La distribución del tamaño de partículas de la cal hidratada está en el rango de nanómetros y ello le confiere ventajas sobre el cemento Pórtland.

El efecto de una pureza de hidróxido de calcio inferior a 80%, que es una menor reactividad, es subsanable a través de un incremento proporcional al déficit en la cantidad de cal, sin que ello afecte la calidad de los subproductos en los que se usa.

Este resultado pone en tela de juicio lo establecido en la Norma Mexicana NMX-C-003-ONNCCE-1996, que fija un contenido mínimo de 80% de hidróxido de calcio para su uso en la construcción, y resulta pertinente su revisión; lo anterior implica que es posible utilizar cualquier marca de cal disponible en el mercado, como de hecho ha ocurrido tradicionalmente antes de la aparición de marcas especializadas de alto contenido de hidróxido de calcio.

Luego de la amplia caracterización presentada como punto de partida para el mejoramiento de la cal, es pertinente el estudio de puzolanas localmente disponibles y que propicien tanto mejor calidad como avances en el impacto ambiental y reducción de costos de producción.

Los resultados obtenidos para un mortero curado en cuarto húmedo a mayor edad son mejores que los que se curaron al aire libre, en este caso el agua influye de manera positiva en estos morteros, dándoles mayor resistencia con el paso del tiempo, logrando que las uniones de sus partículas sean más fuertes, está es una

gran característica de la cal mezclada con la puzolana (caolín), lo que pondría en desventaja al cemento Pórtland.

La Microscopia Electrónica de Barrido ofrece una importante herramienta para materiales cuya morfología y composición microscópica es relevante en sus propiedades. La caracterización por SEM y EDS de materiales compuestos a base de cal para la construcción correlaciona las propiedades mecánicas tanto con la forma de las partículas como con su composición química, y es un complemento de otras técnicas de caracterización.

Referencias

- Alia, J., Edwards, H., Garcia-Navarro, F., Parras-Armenteros, J., and Sanchez-Jimenez, C. 1999. *Application of FT-Raman spectroscopy to quality control in brick clays firing process*. *Talanta*, 50, 291–298.
- Cowper, A. 1927. "Lime and lime mortars". Donhead Publishing LTD, U.K. (Reprinted 2000). I, pp 3-8.
- Delatte, N. J. 2001. "Lessons from Roman Cement and Concrete". *J. Prof. Issues in Engrg. Educ. and Pract.*, 127(3), 109-115.
- Edwards, H., Jorge-Villar, S., Jehlicka, J., and Munshi, T. 2005. *FT-Raman spectroscopic study of calcium-rich and magnesium-rich carbonate minerals*. *Spectrochimica Acta A*: 61(10): 2273-2280.
- Gillet, P., Mcmillan, P., Schott, J., Badro, J., and Grzechnik, A. 1996. *Thermodynamic properties and isotopic fractionation of calcite from vibrational spectroscopy of O-substituted calcite*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(18), 3471-3485.
- Hill, N., Holmes, S., and Mather, D. 1992. *Lime and other alternative cements*. Intermediate Technology Publications, U.K.
- Hofmeister, A., Keppel E., and Speck, A. 2003. *Absorption and reflection infrared spectra of MgO and other diatomic compounds*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 345, 16–38.
- Holmes, S., and Wingate, M. 2003. "Building with lime", revised edition, Ed. ITDG Publishing, U.K.
- Keum, D., Naka, K., and Chujo, Y. 2003. *Unique crystal morphology of hydrophobic CaCO₃ composite by sodium trisilanolate in a mixture of a water-miscible organic solvent and water*. *Journal of Crystal Growth* 259, 411–418.

Park, J., Min, D. and Song, H. 2002. *Structural Investigation of CaO–Al₂O₃ and CaO–Al₂O₃–CaF₂ Slags via Fourier Transform Infrared Spectra*. ISIJ International, 42(1), 38–43.

Shi, Caijun. 2001. *Studies on Several Factors Affecting Hydration and Properties of Lime-Pozzolan Cements*. J. Mat. in Civ. Engrg., 13(6), 441-445.

Tlili, M., Ben Amor, M., Gabrielli, C., Joiret, S., Maurin, G., and Rousseau, P. 2001. *Characterization of CaCO₃ hydrates by micro-Raman spectroscopy*. Journal of Raman Spectroscopy, 33, 10-16.

Miguel José Yacamán, José Reyes. Microscopía electrónica. Una visión del microcosmos. CONACYT. México

Gerardo Vázquez Nin, Olga Echeverría. Introducción a la Microscopía Electrónica. UNAM. 2000

Páginas de Internet:

<http://www.biologia.edu.ar/microscopia/meb.htm#MEB>

http://www.criba.edu.ar/cribabb/servicios/secegrin/microscopia/apunte_col.htm

Norma:

Norma Mexicana NMX-C-003-ONNCCE-1996 (cancela a la Norma Mexicana NMX-C-003-ONNCCE-1982)

ANEXOS

Tabla 5. Resultados de ensayos de compresión de morteros en diferente proporción, porcentaje y a distinto número de días.

Las mezclas 12 y 13, nos sirven para comparar resultados ya que están elaboradas a base de cal, arena y agua, sin aún utilizar puzolanas.

Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

Material	cantidad
Cal	775 gr
Arena	2325 gr
Agua	970 ml

Mezcla 1:3 cal SA – arena 100% < # 8

Espécimen	Fraguado días	Peso g	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
12.1 – cubo	7	180.9	174.24	6.96
12.2 – cubo	7	175.6	155.76	6.23
12.3 – cubo	7	182.3	171.60	6.86
			PROM	6.68

12.4 – cubo	14	180.3	190.96	7.63
12.5 – cubo	14	175.9	136.40	5.45
12.6 – cubo	14	178.9	171.60	6.86
			PROM	6.64

12.7 – cubo	28	178.5	130.24	5.20
12.8 – cubo	28	176.5	164.56	6.58
12.9 – cubo	28	180.5	154.00	6.16
			PROM	5.98

12.10 – cilindro	45	268.9	229.68	11.70
12.11 – cilindro	45	264.7	197.12	10.04
12.12 – cilindro	45	269.7	215.60	10.98
			PROM	10.90

Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

Material	cantidad
Cal	1000 gr
Arena	3000 gr
Agua	1200 ml

Mezcla 1:3 cal SF – arena 100% < # 8

Espécimen	Fraguado días	Peso g	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
13.1 – cilindro	7	290.5	186.56	9.50
13.2 – cilindro	7	292.5	162.80	8.29
13.3 – cilindro	7	296.1	173.36	8.83
			PROM	8.87

13.4 – cilindro	14	294.4	190.96	9.72
13.5 – cilindro	14	283.5	195.36	9.95
13.6 – cilindro	14	288.3	214.72	10.93
			PROM	10.2

13.7 – cilindro	28	288.9	207.68	10.57
13.8 – cilindro	28	290.7	211.20	10.75
			PROM	10.66

13.9 – cilindro	45	295.1	253.44	12.91
13.10 – cilindro	45	293.2	233.20	11.87
			PROM	12.39

Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

Material	cantidad
Cal	542.5 gr
Puzolana (FA)	232.5 gr
Arena	2325 gr
Agua	970 ml

Mezcla 1:3 cal SA – arena 100% < #6; 30% FA

Espécimen	Fraguado días	Peso g	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
6.1 – cubo	7	183.7	115.28	4.61
6.2 – cubo	7	185.2	190.08	7.60

6.3 – cubo	7	184.6	148.72	5.94
			PROM	6.05

6.6 – cubo	14	185.5	176.00	7.04
6.7 – cubo	14	187.6	230.56	9.22
6.8 – cubo	14	188.8	212.08	8.48
			PROM	8.24

6.5 – cubo	28	188.6	212.08	8.48
6.9 – cubo	28	185.6	176.88	7.07
			PROM	7.77

6.10 – cilindro	45	279.1	197.12	10.04
6.11 – cilindro	45	277.0	188.32	9.59
6.12 – cilindro	45	267.9	155.76	7.93
			PROM	9.18

Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

material	cantidad
Cal	700 gr
Puzolana (FA)	300 gr
Arena	3000 gr
agua	1200 ml

Mezcla 1:3 cal SF – arena 100% < #6; 30%FA

Espécimen	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
7.1 – cilindro	7	289.2	131.12	6.67
7.2 – cilindro	7	290.6	128.48	6.54
7.3 – cilindro	7	289.1	146.08	7.44
			PROM	6.88

7.4 – cilindro	14	289.9	Falló al cabecear	-
7.5 – cilindro	14	286.8	146.96	7.48
7.6 – cilindro	14	282.7	161.92	8.24
			PROM	7.86

7.7 – cilindro	28	281.4	249.39	12.70
7.8 – cilindro	28	292.3	258.98	13.19
			PROM	12.94

7.9 – cilindro	45	281.7	161.04	8.20
7.10 – cilindro	45	290.8	170.72	8.69
			PROM	8.44

Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

material	cantidad
Cal	542.5 gr
Puzolana (TJ)	232.5 gr
Arena	2325 gr
agua	970 ml

Mezcla 1:3 cal SA – arena 100% < #8; 30%TJ

Espécimen	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
8.1 – cubo	7	178.4	138.16	5.52
8.2 – cubo	7	180.6	183.04	7.32
8.3 – cubo	7	181.6	188.32	7.53
			PROM	6.79

8.4 – cubo	14	184.4	220.00	8.80
8.5 – cubo	14	179.9	237.60	9.50
8.6 – cubo	14	181.4	177.76	7.11
			PROM	8.47

8.7 – cubo	28	188.1	212.96	8.51
8.8 – cubo	28	187.3	188.32	7.53
8.9 – cubo	28	186.4	219.12	8.76
			PROM	8.26

8.10 – cilindro	45	277.6	205.04	10.44
8.11 – cilindro	45	276.5	210.32	10.71
8.12 – cilindro	45	278.4	195.36	9.95
			PROM	10.36

Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

material	cantidad
Cal	770 gr
Puzolana (TZ)	330 gr
Arena	3300 gr
agua	1215 ml

Mezcla 1:3 cal SA – arena 100% < #8; 30%TZ

Espécimen	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
9.1 – cilindro	7	282.3	194.48	9.90
9.2 – cilindro	7	273.6	188.32	9.59
9.3 – cilindro	7	277.8	190.96	9.72
			PROM	9.73

9.4 – cilindro	14	273.9	150.82	7.60
9.5 – cilindro	14	281.3	145.71	7.42
9.6 – cilindro	14	282.9	152.74	7.78
			PROM	7.6

9.6 – cilindro	28	284.3	231.44	11.79
9.7 – cilindro	28	285.0	210.32	10.71
9.8 – cilindro	28	284.0	227.04	11.56
			PROM	11.35

9.9 – cilindro	45	277.6	283.36	14.43
9.10 – cilindro	45	281.5	254.32	12.95
			PROM	13.69

Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

material	cantidad
Cal	542.5 gr
Puzolana (T1)	232.5 gr
Arena	2325 gr
agua	970 ml

Mezcla 1:3 cal SA – arena 100% < #8; 30%T1

Espécimen	Fraguado días	Peso g	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
10.1 – cubo	7	181.0	179.52	7.18
10.2 – cubo	7	180.5	193.60	7.74
10.3 – cubo	7	183.4	190.0	7.60
			PROM	7.50

10.4 – cubo	14	180.0	228.80	9.15
10.5 – cubo	14	181.1	237.60	9.50
10.6 – cubo	14	174.8	190.08	7.60
			PROM	8.75

10.7 – cubo	28	174.4	177.76	7.11
10.8 – cubo	28	175.3	212.08	8.48
10.9 – cubo	28	180.9	294.80	11.79
			PROM	9.12

10.10 – cilindro	45	267.6	248.16	12.64
10.11 – cilindro	45	271.4	265.76	13.53
10.12 – cilindro	45	269.7	198.00	10.08
			PROM	12.08

Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

material	cantidad
Cal	700 gr
Puzolana (RL)	300 gr
Arena	3000 gr
agua	1200 ml

Mezcla 1:3 cal SA – arena 100% <#8; 30%RL

Espécimen	Fraguado días	Peso g	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
11.1 – cilindro	7	277.2	147.84	7.53
11.2 – cilindro	7	277.1	166.32	8.47
11.3 – cilindro	7	270.4	160.16	8.15
			PROM	8.05

11.4 – cilindro	14	274.9	Falló al cabecear	-
11.5 – cilindro	14	278.7	170.72	8.69
11.6 – cilindro	14	267.6	175.12	8.92
			PROM	8.80

11.7 – cilindro	28	276.8	190.08	9.68
11.8 – cilindro	28	278.1	203.28	10.35
			PROM	10.01

11.9 – cilindro	45	279.3	215.60	10.98
11.10 – cilindro	45	282.3	191.84	9.77
			PROM	10.37

Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

Material	Cantidad en Mezcla 1	Cantidad en Mezcla 2	Cantidad en Mezcla 3	Cantidad en Mezcla 4	Cantidad en Mezcla 5
Cal	1455 gr	1360 gr	1275 gr	1190 gr	1105 gr
Arena	5100 gr	5100 gr	5100 gr	5100 gr	5100 gr
Agua	1530 ml	1530 ml	1530 ml	1530 ml	1530 ml
Puzolana (Caolín)	255 gr	340 gr	425 gr	510 gr	595 gr

Tabla 6. Mezcla: Relación 1:3 cal San Antonio/arena de mina 100% $\lt; \#8$; finos $\lt; 0.5\%$

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
1.1 – cilindro	15	7	270.1	164.56	8.38
1.2 – cilindro	15	7	270.3	133.76	6.81
1.3 – cilindro	15	7	266.5	146.96	7.48
				PROM	7.55

2.1 – cilindro	20	7	282.6	145.20	7.40
2.2 – cilindro	20	7	281.0	177.76	9.05
2.3 – cilindro	20	7	271.3	155.76	7.93
				PROM	8.12

3.1 – cilindro	25	7	284.2	152.43	7.76
3.2 – cilindro	25	7	279.3	153.12	7.80
3.3 – cilindro	25	7	283.3	145.20	7.39
				PROM	7.85

4.1 – cilindro	30	7	277.1	204.1	10.40
4.2 – cilindro	30	7	275.8	226.1	11.52
4.3 – cilindro	30	7	274.2	186.5	9.50
				PROM	10.47

5.1 – cilindro	35	7	263.6	256	11.56
5.2 – cilindro	35	7	260.0	200	9.05
5.3 – cilindro	35	7	263.6	220	9.95
				PROM	10.18

1.4 – cilindro	15	14	281.7	151.44	7.71
1.5 – cilindro	15	14	281.0	155.84	7.93
1.6 – cilindro	15	14	270.3	190.16	9.68
				PROM	8.44

2.4 – cilindro	20	14	271.8	227.04	11.56
2.5 – cilindro	20	14	265.5	219.12	11.16
2.6 – cilindro	20	14	278.6	266.64	13.58
				PROM	12.1

3.4 – cilindro	25	14	267.7	360.80	18.37
3.5 – cilindro	25	14	267.4	338.80	17.25
3.6 – cilindro	25	14	271.2	352.00	17.93
				PROM	17.85

4.4 – cilindro	30	14	275.2	227.04	11.56
4.5 – cilindro	30	14	263.2	173.36	8.83
4.6 – cilindro	30	14	266.0	140.80	7.17
				PROM	9.18

5.4 – cilindro	35	14	278.9	222.64	11.34
5.5 – cilindro	35	14	273.7	223.52	11.38
5.6 – cilindro	35	14	268.5	176.88	9.01
				PROM	10.57

1.7 – cilindro	15	28	283.6	281.6	14.34
1.8 – cilindro	15	28	272.6	299.2	15.24
1.10 – cilindro	15	28	273.0	270.1	13.76
				PROM	14.44

2.7 – cilindro	20	28	265.1	293.0	14.92
2.8 – cilindro	20	28	277.5	304.4	15.51
2.9 – cilindro	20	28	267.0	286.8	14.61
				PROM	15.01

3.7 – cilindro	25	28	282.6	355.5	18.11
3.8 – cilindro	25	28	276.9	344.9	17.57

3.9 - cilindro	25	28	277.9	322.9	16.45
				PROM	17.37

4.13 - cubo	30	28	180.9	262.24	10.48
4.14 - cubo	30	28	175.6	249.92	9.99
4.15 - cubo	30	28	193.0	280.72	11.22
				PROM	10.56

5.13 - cubo	35	28	185.2	320.32	12.81
5.14 - cubo	35	28	184.8	344.96	13.80
5.15 - cubo	35	28	181.8	340.56	13.62
				PROM	13.41

1.14 - cubo	15	60	182.4	325.00	13.00
1.15 - cubo	15	60	181.4	356.20	14.24
1.16 - cubo	15	60	183.9	299.00	11.96
				PROM	13.06

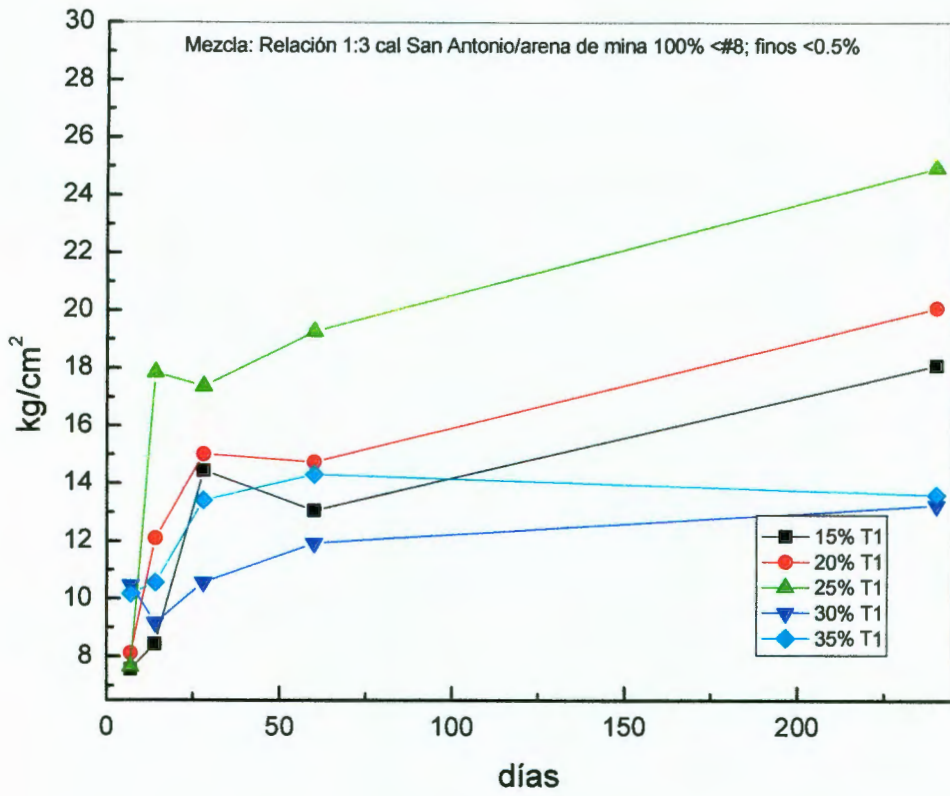
2.14 - cubo	20	60	178.8	374.40	14.97
2.15 - cubo	20	60	184.6	340.60	13.62
2.16 - cubo	20	60	178.9	390.00	15.60
				PROM	14.73

3.14 – cubo	25	60	181.4	457.60	18.30
3.15 – cubo	25	60	186.4	483.12	19.32
3.16 – cubo	25	60	180.4	504.24	20.16
				PROM	19.26

4.18 – cubo	30	60	186.5	315.92	12.62
4.19 – cubo	30	60	181.4	300.96	12.03
4.20 - cubo	30	60	179.5	278.96	11.15
				PROM	11.93

5.16 – cubo	35	60	184.0	355.52	14.22
5.17 – cubo	35	60	182.9	361.68	14.46
5.18 - cubo	35	60	184.6	355.52	14.22
				PROM	14.30

Figura 39. Resistencia a la compresión de morteros con diferentes proporciones de puzolana



Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

Material	Cantidad en Mezcla 1	Cantidad en Mezcla 2	Cantidad en Mezcla 3
Cal	900 gr	780 gr	660 gr
Arena	3000 gr	3000 gr	3000 gr
Agua	1260 ml	1260 ml	1260 ml
Puzolana (Caolín)	300 gr	420 gr	540 gr

Tabla 7. Mezcla: Relación 1:2.5 cal San Antonio/arena de Ottawa C 778

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
1.1 – cubo	25	7			4.05
1.2 – cubo	25	7			3.78
1.3 – cubo	25	7			3.79
				PROM	3.87

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
2.5 – cubo	35	7	212.6		4.10
2.6 – cubo	35	7	211.6		4.58
2.7 – cubo	35	7	207.5		4.19
				PROM	4.29

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
3.1 – cubo	45	7	203.2		4.47
3.2 – cubo	45	7	211.7		5.45
3.3 – cubo	45	7	204.8		3.84
				PROM	4.58

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
1.4 – cubo	25	14	200.8		4.47
1.5 – cubo	25	14	196.0		3.94
1.6 – cubo	25	14	195.0		4.25
				PROM	4.22

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
2.8 – cubo	35	14	203.0		6.21
2.9 – cubo	35	14	204.9		6.88
2.10 – cubo	35	14	194.1		5.52
				PRÓM	6.20

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
3.4 – cubo	45	14	199.4		6.30

3.5 – cubo	45	14	204.0		9.50
3.6 – cubo	45	14	205.1		8.48
				PROM	8.09

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
1.10 – cilindro	25	28	306.72		18.69
1.11 – cilindro	25	28	305.71		17.71
1.12 – cilindro	25	28	315.49		17.66
				PROM	18.02

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
2.10 – cilindro	35	28	319.69		24.75
2.11 – cilindro	35	28	303.33		16.77
2.12 – cilindro	35	28	306.13		16.14
				PROM	19.22

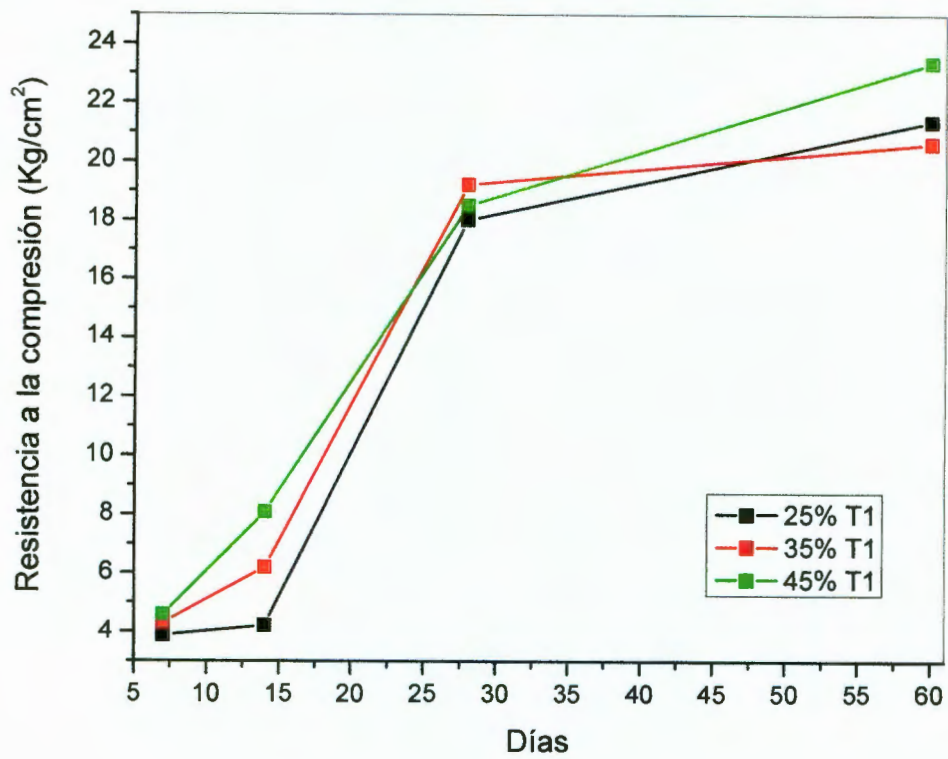
Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
3.10 – cilindro	45	28	320.5		22.06
3.11 – cilindro	45	28	315.1		16.81
3.12 – cilindro	45	28	308.6		16.63
				PROM	18.50

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
1.13 – cilindro	25	60	316.06		23.58
1.14 – cilindro	25	60	301.08		17.48
1.15 – cilindro	25	60	313.68		23.05
				PROM	21.37

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
2.13 – cilindro	35	60	321.59		25.17
2.14 – cilindro	35	60	319.35		21.46
2.15 – cilindro	35	60	306.08		23.44
				PROM	23.36

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
3.13 – cilindro	45	60	305.20		19.59
3.14 – cilindro	45	60	321.71		21.12
3.15 – cilindro	45	60	312.91		21.16
				PROM	20.62

Figura 40. Mortero de cal-arena de Ottawa al aire libre.



Malla #	Peso retenido (g)	% retenido
8	0	0
6	0	0
10	0	0
14	0.17	0.017
16	0.83	0.083
20	26.18	2.618
50	962.79	96.279
60	2.61	0.261
80	2.87	0.287
100	0.61	0.061
200	2.00	0.20
<200	1.94	0.194

Las cantidades de la mezcla son las siguientes:

Material	Cantidad en Mezcla 1	Cantidad en Mezcla 2	Cantidad en Mezcla 3
Cal	450 gr	390 gr	275 gr
Arena	1500 gr	1500 gr	1250 gr
Agua	630 ml	630 ml	580 ml
Puzolana (Caolín)	150 gr	210 gr	225 gr

Tabla 8. Mezcla: Relación 1:2.5 cal San Antonio/arena de río

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
1.1 – cubo curado húmedo	25	7	238.03		2.85
1.2 – cubo curado aire libre	25	7	201.45		5.22
1.3 – cubo curado aire libre	25	7	200.03		4.72
				PROM HUM	2.85
				PROM AIR LIBR	4.97

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
1.4 – cubo curado aire libre	25	14	202.19		8.27
1.6 – cubo curado cuarto húmedo	25	14	239.72		5.67
1.7 – cubo curado cuarto húmedo	25	14	237.76		5.21
				PROM HUM	5.44
				PROM AIR LIBR	8.27

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
1.8 – cilindro curado húmedo	25	28	354.65		12.38

1.12 – cilindro curado aire libre	25	28	312.66		12.19
1.13 – cilindro curado aire libre	25	28	315.28		12.32
				PROM HUM	12.38
				PROM AIR LIBR	12.25

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
2.5 – cubo curado cuarto húmedo	35	7	238.2		4.05
2.6 – cubo curado cuarto húmedo	35	7	237.3		4.30
2.1 – cubo curado aire libre	35	7	208.5		9.47
				PROM HUM	4.17
				PROM AIR LIBR	9.47

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
2.2 – cubo curado aire libre	35	14	205.67	336.00	11.90
2.3 – cubo curado aire libre	35	14	211.24	340.00	12.04
2.7 – cubo curado cuarto húmedo	35	14	237.97	219.00	7.78
				PROM HUM	7.78
				PROM AIR LIBR	11.97

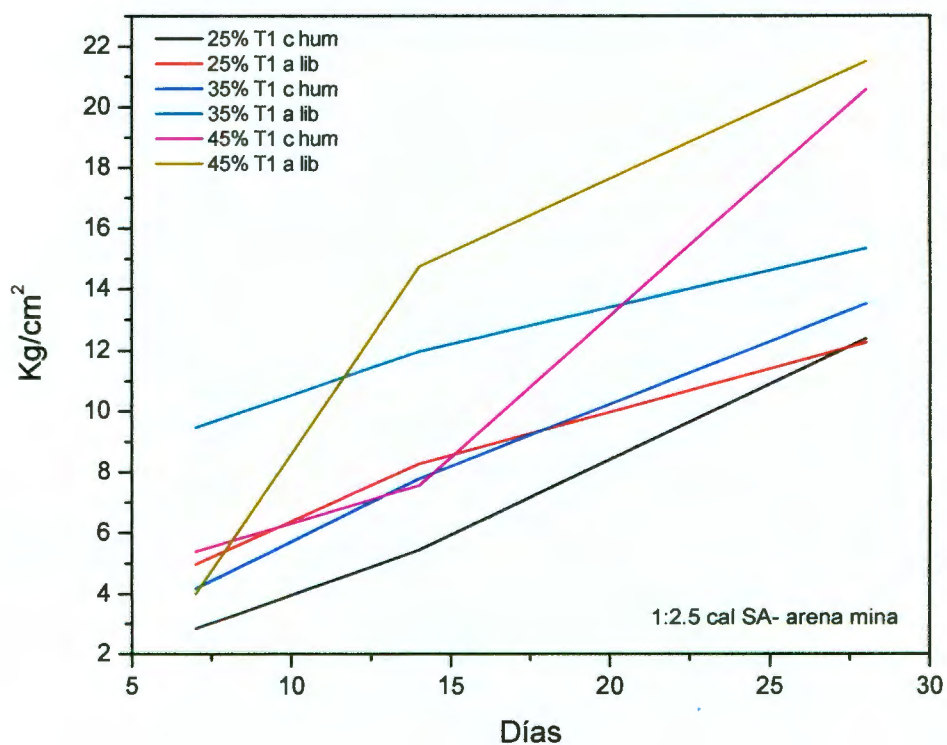
Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
2.10 – cilindro aire libre	35	28	323.64		15.33
2.16 – cilindro curado húmedo	35	28	368.80		12.96
2.17 – cilindro curado húmedo	35	28	364.44		14.08
				PROM HUM	13.52
				PROM AIR LIBR	15.33

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
3.1 – cubo curado cuarto húmedo	45	7	219.84		7.18
3.2 – cubo curado cuarto húmedo	45	7	246.52		3.61
3.3 – cubo curado aire libre	45	7	241.32		4.01
				PROM HUM	5.39
				PROM AIR LIBR	4.01

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
3.4 – cubo curado aire libre	45	14	206.94	424.00	15.00
3.5 – cubo curado aire libre	45	14	208.48	410.00	14.50
3.6 – cubo curado cuarto húmedo	45	14	245.68	212.50	7.55
				PROM HUM	7.55
				PROM AIR LIBR	14.75

Espécimen	caolín %	Fraguado (días)	Peso (g)	Carga de falla (kg)	Resis. comp Kg/cm ²
3.7 – cilindro curado aire libre	45	28	329.77	422.40	21.51
3.8 – cilindro curado cuarto húmedo	45	28	375.54	423.28	21.56
3.9 – cilindro curado cuarto húmedo	45	28	376.65	384.56	19.59
				PROM HUM	20.57
				PROM AIR LIBR	21.51

Figura 41. Ensayes de morteros a base de arena de mina, cal y puzolana en diferentes proporciones, con curado en cuarto húmedo y al aire libre.



Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido para una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana

15/08/2007 11:56:50 a.m.

Project: Caracterización por microscopia electrónica de barrido de una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana

Sample: A

Type: Default

Spectrum processing :

No peaks omitted

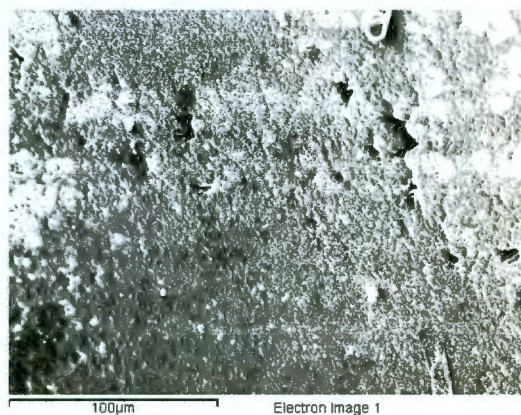
Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 1

Standard :

Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Al K	100.00	100.00
Totals	100.00	



Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido para una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana

15/08/2007 12:02:18 p.m.

Project: Caracterización por microscopia electrónica de barrido de una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana.

Sample: AE

Type: Default

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.145, 2.430, 9.707, 11.477, 13.372 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic %
O	31.61	46.08
Na	2.12	2.15
Al	13.67	11.82
Si	41.18	34.20
K	1.32	0.79
Ca	4.50	2.62
Fe	5.59	2.33
Totals	100.00	



Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido para una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana

15/08/2007 11:56:06 a.m.

Project: Caracterización por microscopia electrónica de barrido de una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana.

Sample: AM

Type: Default

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.144, 2.444, 9.705, 11.475, 13.390 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

Standard :

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	49.33	63.72
Al K	5.80	4.44
Si K	40.73	29.97
K K	0.98	0.52
Ca K	1.19	0.61
Fe K	1.97	0.73
Totals	100.00	



Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido para una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana

15/08/2007 11:56:35 a.m.

Project: Caracterización por microscopia electrónica de barrido de una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana.

Sample: C778

Type: Default

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.146, 2.433, 8.525, 9.705, 11.484, 13.358 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

Standard :

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	24.57	37.97
O K	24.32	28.21
Al K	1.81	1.25
Si K	49.29	32.57
Totals	100.00	

Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido para una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana

15/08/2007 11:57:10 a.m.

Project: Caracterización por microscopia electrónica de barrido de una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana.

Sample: E

Type: Default

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.146, 2.435, 6.395, 8.520, 9.703, 11.466, 13.346 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	13.21	22.02
O K	43.61	54.56
Al K	1.82	1.35
Si K	6.65	4.74
Ca K	34.71	17.33
Totals	100.00	

Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido para una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana

Project: Caracterización por microscopia electrónica de barrido de una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana.

Sample: can 1.04

Type: Default

Spectrum Label: Spectrum 1

Livetime 50.0 s

Acquisition geometry (degrees):

Tilt = 0.0

Azimuth = 0.0

Elevation = 35.0

Accelerating voltage = 20.00 kV

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.

Sample is uncoated

The following elements have been identified but not quantified : Be

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 2.148, 9.708, 11.490 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 3

Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Rb Not defined 1-Jun-1999 12:00 AM

01/11/2007 09:44:24 a.m.
Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido para una
nueva cal hidráulica mejorada con puzolana

Project: Caracterización por microscopia electrónica de barrido de una nueva cal hidráulica mejorada con puzolana.

Sample: can 1.02

Type: Default

Spectrum Label: Spectrum 1

Livetime 50.0 s

Acquisition geometry (degrees):

Tilt = 0.0

Azimuth = 0.0

Elevation = 35.0

Accelerating voltage = 20.00 kV

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.

Sample is uncoated

The element used for optimization was Copper

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 1.670, 2.148, 11.501, 13.378 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 3

Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
t	Conc	Corn.		Sigma	
C K	1.88	0.6281	15.11	2.63	31.04
O K	1.67	0.3553	23.77	3.46	36.65
Ca K	7.97	1.0550	38.14	2.56	23.47
Cu K	2.63	0.8279	16.02	2.28	6.22
Zn K	1.14	0.8300	6.96	2.86	2.63
Totals			100.00		