



**UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO.**

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE  
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PROFESIONAL**

**“ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE MATERIALES (SUSTITUTOS PARCIALES  
DEL CEMENTO), PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DE MORTEROS  
PARA REPARACIÓN Y/O CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE  
CONCRETO”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**ING. MAURICIO ARREOLA SÁNCHEZ**

**ASESOR:**

**M.A. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA**

**COASESOR:**

**DR. JOSÉ IVAN ESCALANTE GARCÍA**



**MORELIA, MICH. AGOSTO DE 2013**

## Dedicatoria

*Dedicado a mis Padres Israel Arreola Barrera y Dalía Sánchez Pineda, a mis Hermanos Mayra, Felipe, Gretel, Carol e Israel y a mi Amore (Judith) por ser mi más grande apoyo e inspiración para no dudar en ningún momento sobre mis metas, por formar parte de todos y cada uno mis sueños, porque son ustedes la más grande bendición que Dios me pudo haber dado...*

*...Los amo hermanos...*

*...Papá, Mamá...*

*...Los amo y los he de amar siempre.*

*Gracias por ser lo que siempre han sido...*

*...Mi familia, Mis Hermanos, Mis Padres.*

*Mauricio Arreola Sánchez*

---

## Agradecimientos

Un ferviente agradecimiento a toda mi familia, a mis abuelos Fabián Sánchez Ambriz (Papá Fabián), a mi abuela Rosalina Pineda Ambriz (Mamá Chalina) y mi abuela Teresa Barrera Coria (Mamá Teresa), a mis padres y hermanos por estar siempre mi lado y en mi apoyo.

A mis amigos y compañeros de la facultad, Mirsha, Héctor Nava, Carlo Tapia, Carlos Coria, Pedro Francisco, Claudio, Luis C. Lobato, Luis Alfonso, Omar, Ramiro y todos mis compañeros de generación; gracias por hacer amena la carrera y liviano todo el estrés que en ella tuvimos, pero sobre todo, gracias por compartir y fundir sus sueños con mis sueños, por hacer de mis anhelos nuestros anhelos.

A mis compañeros y amigos del laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, a Don Chuy (Jesús Zauno Zamudio) por apoyo y asesoría, a Don Chora (Jaime Guadalupe Chora Calderón), Don Rube (Rubén Hernández Guzmán) y Don Jorge (Jorge Héctor García Yezpe por toda su ayuda. A los compañeros, Edwin Rojas G., Sergio Medina, Cipriano Bernabé Reyes, por su gran ayuda prestada, sin ustedes chavos esta tesis no hubiese sido posible, gracias.

A amigos, de la sección de mecánica de suelos, Carlos, Amado y Pedro por su apoyo en las pruebas y por su compañía durante todo este proceso. A Sandra del Carmen, Cindy Lara, Cristina, Norma Y Nalleli de Jesús por alentarme y explicarme mis tantas dudas.

A la Dr. Elia Mercedes Alonso Guzmán y al Ing. Wilfrido Martínez Molina por haberme tenido tanta paciencia y explicarme y replantearme las cosas cada vez que yo lo olvidaba, ¡¡Mil gracias!! Que Dios los bendiga siempre.

Agradezco a todas esas personas que de una u otra forma han apoyado en la realización de mi carrera, a aquellos que en el momento que yo les solicite su ayuda, solo preguntaron “¿en qué?” y en ningún momento preguntaron “¿por qué?”. Agradezco a todos aquellos que de alguna manera renunciaron a algo que amenizaría sus vidas, por aligerar mi carga y deberes. A todos ustedes en verdad les digo: “Lo que han hecho por mí no podré pagárselos nunca, pero se los agradeceré siempre”.

Y sobre todo agradezco inmensamente a Dios y sus Ángeles aliados por estar presentes en cada momento de mi vida, por no permitir que se marchite la llama que ilumina todos mis sueños, por cuidarme siempre, por no permitir que me rinda en ningún momento.

*Mauricio Arreola Sánchez*

## Índice

CAPÍTULO 1. JUSTIFICACIÓN.....	6
1.1 RESUMEN.....	6
1.2 OBJETIVO .....	7
1.3 ALCANCES .....	7
1.4 INTRODUCCIÓN .....	8
1.5 JUSTIFICACIÓN .....	9
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	13
2.1 CEMENTOS.....	13
2.1.1 Historia del cemento .....	13
2.1.2 Proceso de fabricación del cemento portland .....	16
2.1.3 Tipos de cementos y cementantes.....	21
2.1.4 Usos de Cementos.....	23
2.2 CONCRETO .....	25
2.2.1 Tipos y usos.....	25
2.2.2 Criterios de diseño.....	30
2.2.3 Durabilidad del concreto .....	32
2.2.4 Mecanismos y factores de degradación.....	34
2.2.5 Métodos de prevención .....	41
2.3 Morteros.....	43
2.3.1 Tipos y usos.....	43
2.3.2 Morteros para rehabilitación de estructuras .....	46
2.4 Aditivos .....	49
2.4.1 Tipos y usos.....	49
2.5 Características y propiedades de los morteros y concretos.....	51

*Mauricio Arreola Sánchez*

2.5.1 propiedades del cemento.....	53
2.5.2 características de morteros y concretos en estado fresco.....	60
2.5.3 características de morteros y concretos en estado endurecido .....	62
2.6 Puzolanas .....	67
2.6.1 reacción de la puzolana .....	68
2.6.2 Clasificación de las puzolanas.....	69
2.6.3 Tipos y usos de puzolanas .....	70
2.6.4 Pruebas de caracterización de las puzolanas .....	76
CAPÍTULO 3. MATERIALES SUJETOS A ESTUDIO.....	82
3.1 Elección de materiales puzolánicos.....	82
3.1.1 Materiales de alta temperatura .....	82
3.1.2 cenizas orgánicas .....	92
3.1.3 residuos industriales.....	104
3.1.4 Fibras orgánicas .....	109
3.1.5 Cemento portland CPC .....	110
3.1.6 Áridos inertes (arena) empleados. ....	113
3.2 Equipo de caracterización utilizado.....	116
CAPÍTULO 4. DISEÑO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS A REALIZAR .....	117
4.1 Diseño de mezclas .....	117
4.1.1 Etapa preliminar .....	117
4.1.2 Elaboración de las mezclas .....	124
4.2 Pruebas destructivas .....	125
4.3 Pruebas no destructivas .....	131
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	135
5.1 caracterización de los áridos .....	135
5.1.1 Arena de Huajúbaro .....	135
5.1.2 Arena del rio Lerma .....	138
5.2 Pruebas mecánicas .....	141

*Mauricio Arreola Sánchez*

---

5.2.1 Carga axial.....	142
5.2.2 Flexión.....	145
5.2.3 Tensión .....	148
5.2.4 Adherencia.....	151
5.2.5 Índice de actividad puzolánica (IAP).....	154
5.3 Prueba de ataque por sulfatos .....	157
5.3.1 Materiales de alta temperatura .....	157
5.3.2 Cenizas orgánicas.....	161
5.3.3 Residuos industriales.....	165
5.3.4 Fibras orgánicas .....	167
5.4 Pruebas no destructivas .....	168
5.4.1 Resistividad eléctrica .....	169
5.4.2 Velocidad de pulso ultrasónico (VPUS) .....	172
5.4.3 Porosidad total .....	175
5.4.4 Densidad .....	178
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS COMPARATIVO.....	181
6.1 Comparación gráfica de las diferentes mezclas .....	181
6.1.1 Pruebas mecánicas .....	181
6.1.2 Prueba de durabilidad .....	186
6.1.3 Pruebas no destructivas .....	190
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES .....	195
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA .....	196

# CAPÍTULO 1. JUSTIFICACIÓN

## 1.1 RESUMEN

El presente trabajo es una investigación sobre la factibilidad del uso de diferentes puzolanas, de origen natural y artificial, como sustitutos parciales del cemento Portland (CP), los materiales estudiados se clasificaron según su origen en: minerales de alta temperatura: Metacaolín (MK), Perlita Natural (PN), Perlita Expandida (PE) y Ceniza de Carbón Mineral (CM); de cenizas orgánicas: Bagazo de Caña (CBC) y Carbón Vegetal (CCV), Ceniza de Elaboración de Ladrillo (CEL); de residuos industriales: Escoria de Alto Horno (EAH) y Horno de BOF (blast oxygen furnace?) (CBOF); y de fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco (FN); se realizaron morteros para mejorar mediante una dosificación, sus propiedades físico-mecánicas. Los morteros se sometieron a pruebas destructivas en estado endurecido: compresión, tensión, flexión y adherencia; así como no destructivas en estado endurecido: velocidad de pulso, resistividad eléctrica, densidad y porosidad total; pruebas no destructivas en estado fresco: fluidez; además de una prueba de durabilidad: ataque por sulfatos. Las edades de prueba fueron 14, 28, 45, 90 y 180 días (MK, PN, PE, CBC, CCV y CEL) y hasta 90 días (CM, EAH, CBOF Y FN). Primero se comparó los resultados de las sustituciones de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% en peso de la masa de CP con respecto a un mortero testigo (cemento-arena-agua). Se elaboró un estudio comparativo del empleo de pruebas destructivas y las pruebas no destructivas fueron usadas para estimar la calidad y porosidad de cada mezcla.

Se observó que en las sustituciones de MK y CBC se incrementa las propiedades mecánicas; las pruebas de resistividad eléctrica y velocidad de pulso, nos indican de manera indirecta la porosidad del material. Con la sustitución parcial del cemento y al realizar pruebas no destructivas; se reduce sensiblemente el problema de durabilidad y emisiones de CO<sub>2</sub>, y en consecuencia se propicia un ahorro energético y una menor afectación al ambiente.

## **1.2 OBJETIVO**

El objetivo de esta investigación, es diseñar, elaborar y evaluar una mezcla que incorpore las cenizas y materiales puzolánicos, como un sustituto parcial del cemento portland, utilizado comúnmente en obras de infraestructura. Esto con el fin de lograr la elaboración y/o reparación de concretos con un mejor desempeño ante agentes corrosivos y deterioro del mismo por interacción con el medio ambiente; esperando también lograr un consumo menor del cemento portland.

En general con esto pretendemos dar un producto que logre atenuar los problemas de contaminación causados por la producción del cemento, y que a la vez nos permita construir y/o reparar obras con mayor durabilidad y un menor costo de elaboración y mantenimiento.

Otro objetivo es diseñar un mortero de base cemento con adiciones para restauración de daños (exfoliaciones, delaminaciones, desprendimiento del recubrimiento, aislante del refuerzo metálico, etc.) en obras civiles de concreto reforzado para infraestructura.

## **1.3 ALCANCES**

- Estudiar el comportamiento de diferentes materiales potencialmente puzolánicos.
- Determinar qué tipo de material presenta un mejor comportamiento como aditivo en el cemento.
- Determinar las propiedades y aportaciones de dichos materiales al cemento.
- Determinar si es factible o no, el uso de dichos materiales puzolánicos en la elaboración de morteros, con el fin de incrementar su durabilidad.
- Determinar hasta qué porcentaje es viable sustituir el cemento portland por dichos materiales puzolánicos.



## 1.4 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha dado mucha importancia a la durabilidad del concreto, ya que el comportamiento que han presentado las estructuras diseñadas bajo los criterios de resistencia no han sido los adecuados.

Se ha comprobado que para lograr que una estructura de concreto reforzado logre cubrir su vida útil en condiciones óptimas de servicio, es indispensable considerar, además de un buen diseño por resistencia, un diseño por durabilidad.

Existen varios mecanismos que disminuyen la durabilidad de los elementos elaborados con cemento portland, y con ello disminuye la vida útil de una estructura, como son las reacciones álcali-sílice, reacciones álcali-carbonato y ataques por sulfatos.

Una manera de prevenir la acción de estos mecanismos en el cemento, es la utilización de puzolanas como sustitutos parciales del cemento. Las puzolanas son materiales que al ser agregados al concreto y mortero mejoran sus características físico-mecánicas.

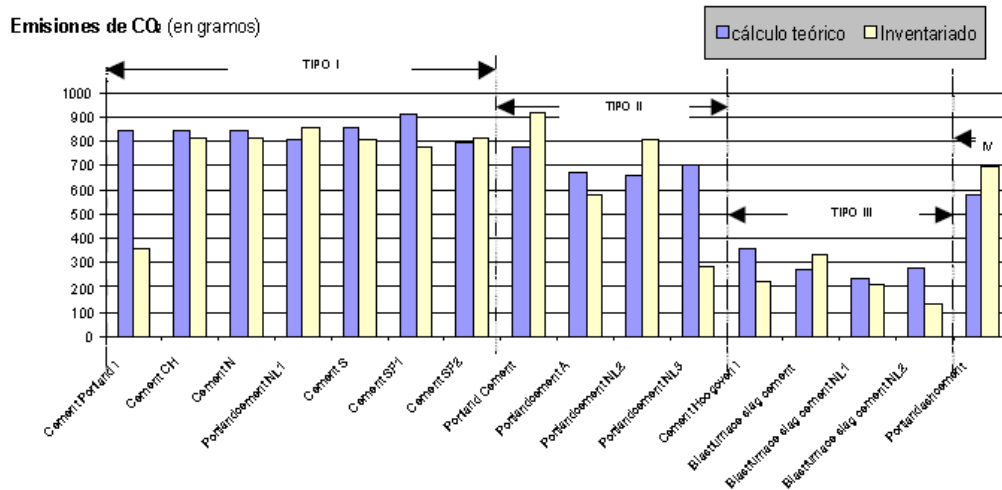
Las puzolanas fueron ampliamente usadas en la antigüedad, antes de la invención del cemento portland, y ahora se ha demostrado en varias investigaciones realizadas en México y en diversos países que las puzolanas de origen orgánico logran un mejor desempeño del concreto.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

En nuestro país en gran medida los avances tanto científicos como tecnológicos están encaminados a la generación de nuevos productos, conjuntamente con el establecimiento de nuevos procesos que garanticen un desarrollo sustentable, los cuales involucran sin dejar duda a todas las áreas del conocimiento <sup>[1]</sup>.

En general, es notable el incremento de la producción de cemento que han experimentado los países del tercer mundo en las últimas décadas. La producción global para el año 2005 se sitúa en 2,272 millones de toneladas, esto denota un elevado y sostenido crecimiento que se acompaña con un incremento en el impacto que se genera sobre el medio ambiente por las emisiones de CO<sub>2</sub> <sup>[2]</sup>.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen del tipo de cemento, o mejor dicho de la cantidad de clínker que tiene el cemento, ya que la aportación principal de CO<sub>2</sub> se produce en la fabricación del clínker. Para los cementos tipo I la emisión de CO<sub>2</sub> se sitúa en 800 gramos de CO<sub>2</sub> por kg de cemento (ver gráfica 1-1), disminuyendo para los otros tipos de cementos en los que disminuye el contenido del clínker <sup>[3]</sup>.

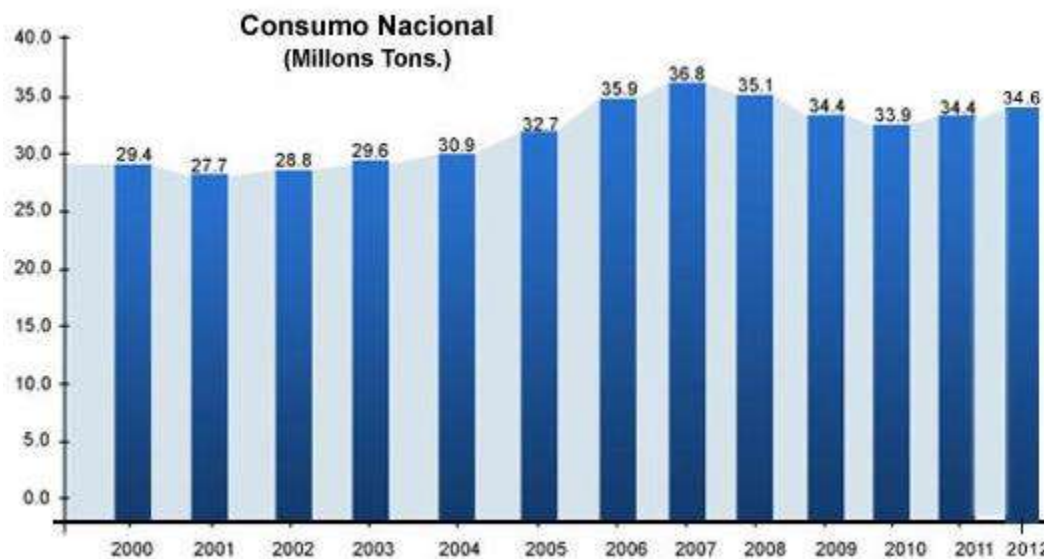


Gráfica 1-1. Emisiones de CO<sub>2</sub> en la fabricación del cemento <sup>[3]</sup>.

En México el consumo de cemento para 2012 fue de 295 kg/habitante, con una producción para ese mismo año de 36.2 millones de toneladas y un consumo de 34.6 millones de toneladas, como se observa en la gráfica 1-2 y 1-3 <sup>[4]</sup>.



Grafica 1-2. Producción nacional de cemento.



Grafica 1-3. Consumo de cemento en México.

El alto consumo de recursos naturales, energéticos y las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes comprometen las posibilidades futuras de utilización de este material.

Para atenuar esta sustitución se trabaja en la disminución de su impacto ambiental, por dos vías; la de mejorar la eficiencia de los procesos de producción en

*Mauricio Arreola Sánchez*

planta y la de disminuir el consumo del cemento en obra utilizando adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto <sup>[2]</sup>.

Otro problema de gran importancia en nuestro país, en la rama de las vías terrestres, es el mal estado que presentan los puentes carreteros; esto se debe en gran parte a los criterios de diseño imperantes en México. Durante el año 2012 la SCT gasto 422.07 millones de pesos en reconstrucción de puentes <sup>[5]</sup> y se asignaron para 2013, 508.2 millones de pesos más para la reconstrucción de puentes <sup>[6]</sup>.

En los últimos veinte años el término “durabilidad” se ha escuchado con más frecuencia en la ingeniería civil. Países industrializados como EUA, algunos en Europa (España, Francia, Reino Unido) y Japón, la han tomado como tema de gran importancia, invirtiendo sumas millonarias en estudios de investigación.

En Latinoamérica un esfuerzo similar se realizó en 1997 al presentarse el reporte de la Red Temática Iberoamericana DURAR (1997), en el cual se expusieron algunos conceptos básicos sobre vida útil, evaluación, mantenimiento, reparación y/o rehabilitación de obras de concreto armado dañadas principalmente por corrosión de la armadura. La vida útil de una estructura se definió por DURAR como “el periodo de tiempo durante el cual la estructura conserva todas las características de funcionalidad, seguridad, resistencia y aspecto externo, con un nivel de seguridad suficiente” <sup>[7]</sup>.

Con el descubrimiento de nuevos compuestos se incrementaron considerablemente las posibilidades para reducir la proporción del cemento en la mezcla, sin afectar su resistencia, además de mejorar sus propiedades.

Para mejorar las condiciones mecánicas de los concretos fabricados con cemento Portland, es necesario implementar la utilización de materiales suplementarios como es el empleo de materiales puzolánicos tanto de origen natural como procesados artificialmente <sup>[1]</sup>.

Las puzolanas en general, sobre todo las de origen artificial, constituyen una de las experiencias más alentadoras en la búsqueda de sustitutos más sustentables, ecológica y económicamente, del cemento <sup>[2]</sup>.

La utilización de residuos de origen orgánico (cenizas de bagazo de caña, cascarilla de arroz, carbón vegetal, aserrín, etc.), en la producción de las mezclas de concreto y mortero trae beneficios para el medio ambiente, ya que contribuye a reducir un volumen

*Mauricio Arreola Sánchez*

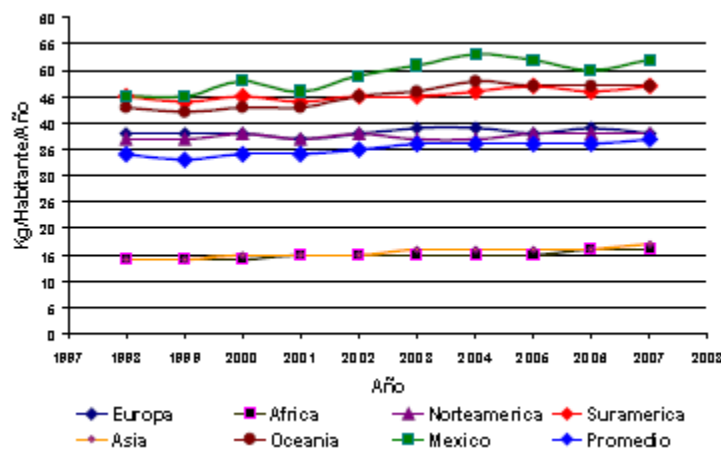
importante de emisiones de CO<sub>2</sub>, el uso de estos subproductos agroindustriales permitirá reducir sustancialmente una parte importante de la producción de cemento <sup>[1]</sup>.

La producción de estos subproductos en nuestro país es la siguiente:

### **Ceniza de Bagazo de Caña**

México es quinto lugar en producción de caña, en el periodo 2008-2009 se incendiaron en la industria mexicana 10 millones de toneladas de bagazo de caña <sup>[8]</sup>.

Según la SAGARPA (*Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*) en México se produce anualmente un promedio de **43'535,664.77 toneladas** de caña, y se consumen, para la producción de los diversos productos azucareros y en otras actividades no especificadas, **91.88 Petajoules** de energía. <sup>[9]</sup> En la gráfica 1-4 se muestra el consumo de azúcar en México.



Gráfica 1-1. Consumo de azúcar en México (Periodo 1998-2007) <sup>[10]</sup>

Se tienen localizados cuatro ingenios azucareros en el estado de Michoacán, uno está en el municipio de Tacámbaro, otro en el municipio de Tocumbo, el tercero en el municipio de Taretan y en el municipio de Los Reyes.

### **Ceniza de Carbón Vegetal**

Según datos de la SAGARPA, la producción de carbón vegetal en nuestro país es en promedio de **262,320 M<sup>3</sup>r/año** y de leña es de **336,857 M<sup>3</sup>r/año**. Al igual que el caso de la caña existe un consumo de energía proveniente de estos productos; para el caso de la leña se consumen, dentro del sector residencial, en promedio **247.086 Petajoules/año**. <sup>[9]</sup>

Para la obtención de la ceniza de carbón vegetal y leña se tiene identificado un productor en el poblado de “La Soledad”, ubicado en el lado oeste de la ciudad de Morelia, en el estado de Michoacán.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 CEMENTOS

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio <sup>[11]</sup>, que es producido por la cocción a una fusión parcial, a una temperatura de aproximadamente 1500° C <sup>[12]</sup>. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada, piedra machacada, pedrejón u otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo.

#### 2.1.1 Historia del cemento

Los constructores antiguos usaban la arcilla para unir piedras para formar una estructura sólida de protección. El concreto más antiguo descubierto data de cerca de 7000 AC y fue encontrado en Yiftah El en Galilea, Israel. Éste consiste en un concreto de cal, preparado con caliza calcinada para producir cal rápida (cal viva, cal virgen), la cual al mezclarse con el agua y piedra, se endureció formando el concreto.

En aproximadamente 2500 AC, se empleó un material cementante entre los bloques de piedras en la construcción de la gran pirámide en Giza, en el Egipto antiguo. Algunos informes dicen que era un mortero de cal, mientras que otros dicen que el material cementante se produjo por la quema de sulfato de calcio. En 500 AC, el arte de la producción de morteros a base de cal llegó a Grecia antigua. Los griegos usaban materiales a base de cal como aglomerantes (conglomerantes) entre piedras y ladrillos y como material para una capa de revestimiento de calizas porosas normalmente usadas en la construcción de sus templos y palacios.

*Mauricio Arreola Sánchez*

Fueron encontrados ejemplos del concreto del antiguo imperio romano, que datan de 300 AC. La palabra concreto es derivada del latín “concretus”, que significa crecido junto o compuesto. Los romanos perfeccionaron el uso de puzolanas como material cementante. En un momento del siglo II AC, los romanos extrajeron cenizas volcánicas cerca de Pozzuoli; pensando que era arena, la mezclaron con cal y descubrieron que la mezcla era mucho más resistente que las que se produjeron anteriormente. El descubrimiento tuvo un efecto importante en la industria de la construcción.

El material no era arena, sino una ceniza volcánica fina, conteniendo sílice y alúmina, las cuales combinadas químicamente con la cal, producen lo que se llama cemento puzolánico.

Los constructores de los famosos muros de Roma, acueductos y otras estructuras históricas, incluyendo el teatro en Pompeya (con capacidad para 20,000 espectadores), el Coliseo y el Panteón en Roma usaron este material.

Parece que la puzolana fue ignorada durante la edad media, cuando las prácticas de construcción eran mucho menos refinadas que las antiguas y la calidad de los materiales cementantes deteriorada. La práctica de calcinación de la cal y el uso de puzolanas no se usó nuevamente hasta el siglo XIV.

No se hicieron esfuerzos hasta el siglo XVIII para determinarse porque algunas calces poseían propiedades hidráulicas mientras que otras (aquellas producidas de calizas fundamentalmente puras) no las poseían. John Smeaton, concentró su trabajo en este campo. Descubrió que las calizas impuras y blandas, conteniendo materiales arcillosos, producían los mejores cementos hidráulicos. Él ha empleado este cemento combinado con la puzolana, importada de Italia, en su proyecto para la reconstrucción del faro de Eddystone en el Canal de la Mancha, sudoeste de Plymouth, Inglaterra. Se ha reconocido esta obra como una importante realización en el desarrollo de la industria del cemento. Un gran número de descubrimientos se siguieron en la industria del cemento natural, provenientes de los esfuerzos direccionados para la producción de un material de calidad consistente.

La diferencia entre la cal hidráulica y el cemento natural es función de la temperatura alcanzada durante la calcinación. Además, una cal hidráulica puede hidratarse en una forma de “terrón”, mientras que los cementos naturales deben ser finamente molidos antes de la hidratación.

*Mauricio Arreola Sánchez*

El cemento natural es más resistente que la cal hidráulica, pero menos resistente que el cemento portland. El cemento natural se fabricó en Rosendale, Nueva York en el inicio del siglo XIX.

El desarrollo del cemento portland es el resultado de la investigación persistente de la ciencia y la industria para producir un cemento natural de calidad superior. La invención del cemento portland se atribuye normalmente a Joseph Aspdin, un albañil inglés. En 1824, obtuvo la patente para este producto, al cual lo denominó cemento portland pues producía un concreto con color semejante a la caliza natural que se explotaba en la isla de Portland en el Canal de la Mancha. Este nombre permanece hasta hoy y se usa en todo el mundo, con la adición de las marcas y nombres comerciales de sus productores. <sup>[11]</sup>

Joseph Aspdin no fue el primero en producir un cemento de silicato de calcio, pero su patente le dio la prioridad para el uso del término "Cemento Portland". Otros trabajadores fueron activos al mismo tiempo o antes, destaca Louis Vicat en Francia. <sup>[12]</sup>

Aspdin fue el primero en prescribir una fórmula para el cemento portland y el primero en patentarlo. Sin embargo, en 1845, I. C. Johnson de White and Sons, Swanscombe, Inglaterra, afirmó que había “quemado el cemento crudo con una temperatura extraordinariamente alta hasta que la masa casi se vitrificó”, produciendo un cemento portland como ahora lo conocemos. Este cemento se volvió la elección popular en la mitad del siglo XIX y se exportó de Inglaterra para varias partes del mundo. La producción también empezó en Bélgica, Francia y Alemania aproximadamente en el mismo periodo y la exportación de estos productos de Europa para los Estados Unidos comenzó en 1865. El primer embarque de cemento portland para los EE.UU. fue en 1868. El primer cemento portland producido en EE.UU. se fabricó en una planta en Coplay, Pensilvania, en 1871. La producción de cemento en Latinoamérica empezó al final del siglo XIX y principio del siglo XX: 1888 en Brasil, 1897 en Guatemala, 1898 en Cuba, 1903 en México, 1907 en Venezuela, 1908 en Chile, 1909 en Colombia, 1912 en Uruguay, 1916 en Perú, 1919 en Argentina, 1923 en Ecuador, 1926 en Paraguay, 1928 en Bolivia y más recientemente en 1936 en Puerto Rico, 1941 en Nicaragua y 1949 en El Salvador. <sup>[11]</sup>

En México a principios del siglo XX fue cuando se empezó consumir el cemento importado de Inglaterra y para 1906 se constituyó la primera Compañía de Cementos Portland, en Toluca estado de Hidalgo, cuyo primer horno comenzó a trabajar en 1909. La revolución mexicana de 1920 y la crisis mundial de 1929 fueron factores determinantes que retrasaron el desarrollo de la industria cementera mexicana; sin embargo, Desde

*Mauricio Arreola Sánchez*



principios del siglo XX el uso del cemento se ha popularizado hasta convertirse en un producto estratégico para el crecimiento económico. En México las primeras fábricas iniciaron a principios del siglo XX. Actualmente México tiene la tercera empresa más importante del mundo en la producción de cemento, a pesar de ser el décimo productor mundial. <sup>[13]</sup>

### **2.1.2 Proceso de fabricación del cemento portland**

El cemento portland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroatuminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final.

Los materiales usados para la producción del cemento portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio ( $\text{CaO}$ ), sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Durante la fabricación, se hace análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizar una calidad alta y uniforme del cemento.

Los diagramas en las Imágenes 2-1 y 2-2 muestran las etapas de la fabricación del cemento. Como las operaciones de las plantas de cemento no son básicamente iguales, no se pueden ilustrar adecuadamente por un mismo gráfico todas las plantas. No hay instalaciones típicas para la producción del cemento; cada planta tiene diferencias significativas en disposición, equipos o apariencia general.

Las materias primas seleccionadas (Tabla 2-1) se transportan de la cantera, se trituran, se muelen y se dosifican de tal manera que la harina resultante tenga la composición deseada.

Tabla 2-1. Fuentes de las Materias Primas Usadas y la Fabricación del Cemento Portland <sup>[11]</sup>

<u>Cal, CaO</u>	<u>Hierro Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	<u>Sílice SiO<sub>2</sub></u>	<u>Alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u>	<u>Yeso o Sulfato, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O</u>
Desechos industriales	Polvo de humo de horno de fundición	Silicato de calcio	Mineral de aluminio*	Anhidrita
Aragonita*	Arcilla*	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita*	Mineral de hierro*	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso*
Polvo del horno de cemento	Costras de laminado*	Ceniza volante	Arcilla*	
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Greda	Escoria de cobre	
Creta	Cenizas de pirita	Caliza	Ceniza volante*	
Arcilla	Esquisto	Loes	Greda	
Greda		Marga*	Granodiorita	
Caliza*		Lavaduras de mineral	Caliza	
Mármol		Cuarcita	Loes	
Marga*		Ceniza de	Lavaduras de mineral	
Coquilla		de arroz	Esquisto*	
Esquisto*		Arena*	Escoria	
Escoria		Arenisca	Estaurólita	
		Esquisto*		
		Escoria		
		Basalto		

Nota: Muchos subproductos industriales tienen potencial como materia prima para la producción del cemento portland.

\* Las fuentes más comunes

La harina cruda es generalmente una mezcla de material calcáreo (carbonato de calcio), tal como la caliza y material arcilloso (sílice y alúmina), tal como arcilla, pizarra (esquisto) o escoria de alto horno. El cemento se fabrica tanto por vía seca como por vía húmeda.

En el proceso de vía seca, las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso vía húmeda los materiales se mezclan con agua en la forma de lechada. En otros aspectos, el proceso seco y el proceso húmedo son muy similares.

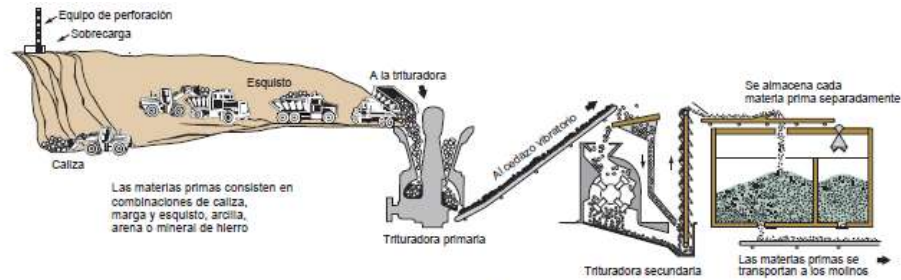
Después del mezclado, se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno. La harina cruda pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. El combustible (carbón, aceite nuevo o reciclado, fuel-oil, gas natural, llantas de goma y subproductos) se fuerza hacia la parte inferior del horno donde las temperaturas de 1400°C a 1550°C cambian químicamente el material crudo en clínker, pelotitas grises con tamaño predominante de canicas.

Después de esto, el clínker se enfría y se pulveriza. Durante esta operación, se adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado (fragüe) del cemento y para que se mejoren las propiedades de contracción (retracción) y el desarrollo de resistencia. En el molino, el clínker se muele tan fino que puede pasar, casi completamente, a través de un tamiz (cedazo) de 45 micrómetros (malla No. 325). Este polvo gris extremadamente fino es el cemento portland.

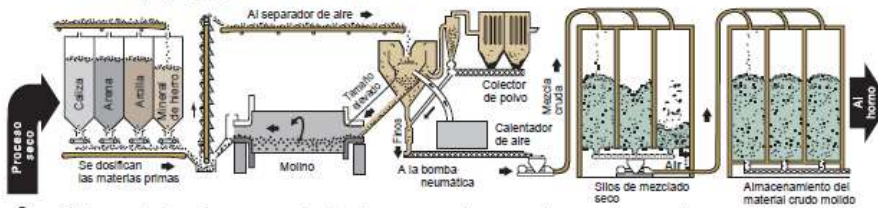
La imagen 2-2 ilustra desarrollos tecnológicos importantes, los cuales pueden mejorar considerablemente la productividad y la eficiencia energética de las plantas con proceso seco.<sup>[11]</sup>

Los hornos rotatorios, utilizados en la primera mitad del siglo XX fueron los hornos de proceso por vía húmeda que se alimentaban con la mezcla en bruto en forma de una suspensión o lechada. Los contenidos de humedad eran típicamente del 40% en masa y, aunque el proceso húmedo permitió a la mezcla de materias primas ser homogeneizadas con facilidad, llevado a un gasto de combustible muy alto, como el agua presente tenía que ser expulsada en el horno.

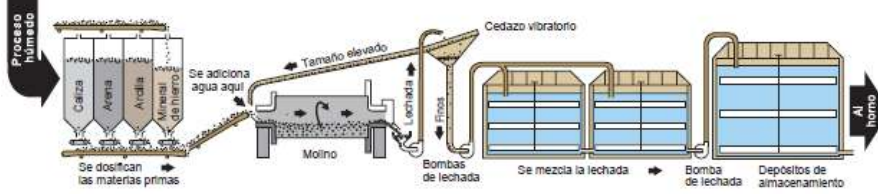
En la segunda mitad del siglo XX se hicieron avances significativos que han culminado en el desarrollo del horno de proceso seco de precalcinación (imagen 2-2). En este tipo de horno, la etapa de consumo de energía de descarbonatación de la piedra caliza presente en el crudo se completa antes de que la alimentación entre en el horno rotatorio. La precalcinación de la alimentación aporta muchas ventajas, la más importante de las cuales es de salida alta del horno de un horno rotativo relativamente corto y de diámetro pequeño. Casi todos los nuevos hornos instalados desde el año 1980 han sido de este tipo.<sup>[12]</sup>



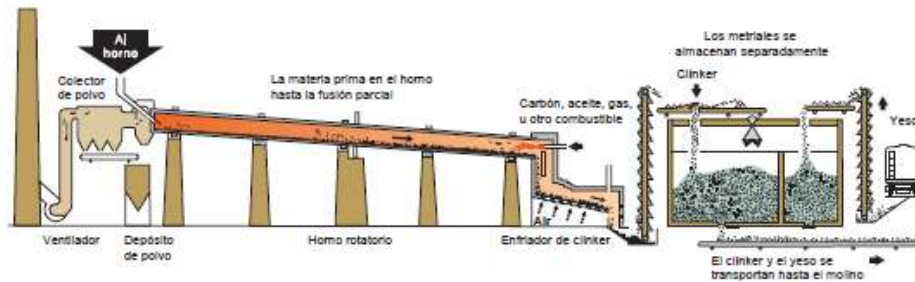
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces almacenarla.



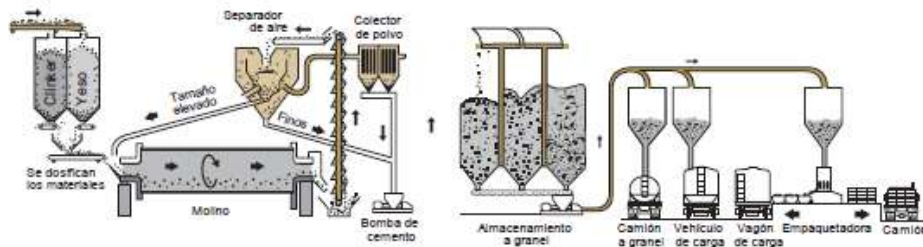
2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



2. Las materias primas se muelen, se mezclan con el agua para formar una lechada (pasta) y se mezclan.



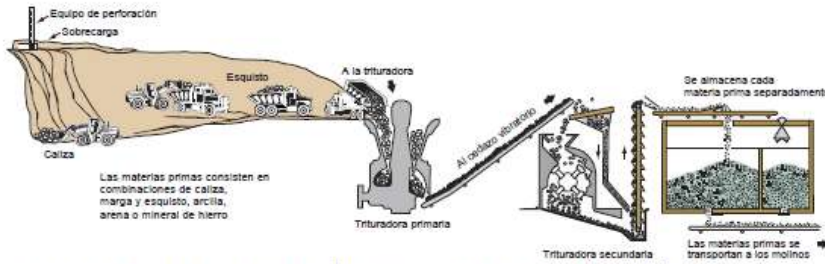
3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clinker de cemento.



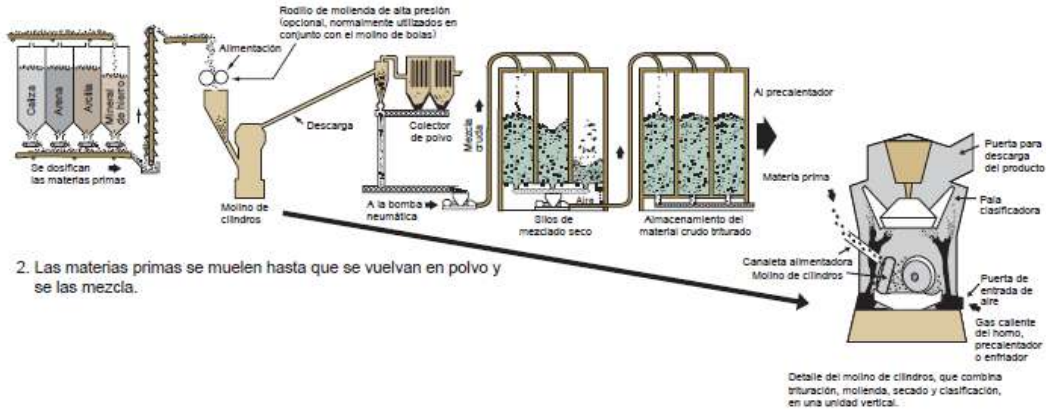
4. Se muele el clinker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

Imagen 2-1. Etapas en la producción tradicional del cemento portland. [11]

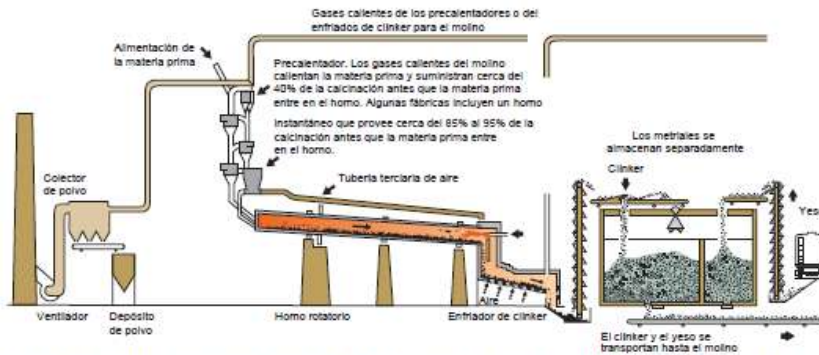
Mauricio Arreola Sánchez



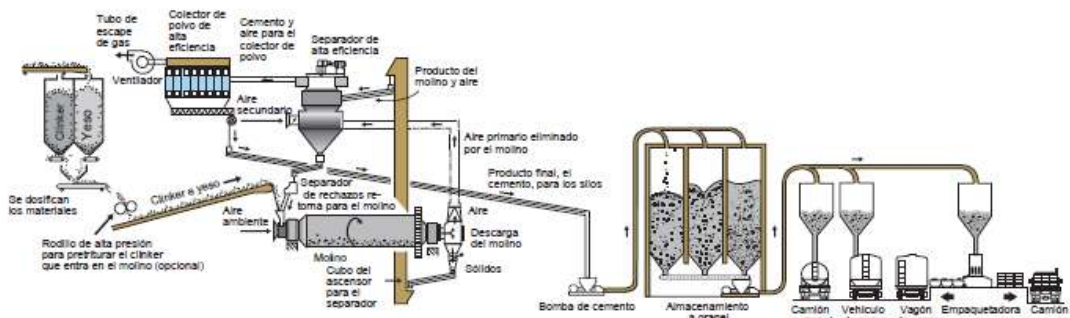
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces almacenarla.



2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clínker de cemento. Observe el precalentador de cuatro etapas, el horno instantáneo y el horno con menor longitud.



4. Se muele el clínker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

Imagen 2-2. Etapas en la producción moderna del cemento portland, a través del proceso seco. [11]

Mauricio Arreola Sánchez



### 2.1.3 Tipos de cementos y cementantes

En el sentido general de la palabra, el cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos naturales para formar un todo compacto. Esta definición comprende una gran variedad de materiales cementantes. <sup>[14]</sup>

Los aglutinantes o cementantes son materiales que mezclados con agua o algún solvente se hacen plásticos y al endurecer logran alcanzar un grado de resistencia mecánica. Las cuales pueden ser cal, cemento, yeso, arcilla <sup>[15]</sup>, escoria granulada de alto horno molida, cemento natural, y combinaciones de estos y de otros materiales <sup>[16]</sup>, sustancias o materiales que sirven para aglomerar, adherir, unir, etc. De acuerdo con sus características proporcionan al mortero o concreto resistencia, tiempo de fraguado, durabilidad y economía diferentes. <sup>[15]</sup>

Para efectos de construcción, el significado del término cemento restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arenas, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los principales componentes de este tipo de cementos son compuestos de cal, de modo que en construcción e ingeniería civil se trabaja con cementos calcáreos. Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tiene la propiedad de fraguar y endurecer bajo o sumergidos en agua, en virtud de que experimentan una reacción química con esta y, por lo tanto, se denominan cementos hidráulicos. <sup>[14]</sup>

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permite la unión de fragmentos minerales y entre sí, formando un todo compacto. En la construcción se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico que se denomina cemento portland, debido a que es el más común. El cemento portland es una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación. <sup>[17]</sup>

Actualmente se fabrican varios tipos de cemento portland para satisfacer varios requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas.

La clasificación de los tipos de cemento (tabla 2-2) esta proporcionada por la norma NMX-C-414-ONNCE-2004, estos son los que se utilizan en la industria de la construcción en México para las distintas obras, la cual establece lo siguiente: <sup>[18]</sup>

*Mauricio Arreola Sánchez*

Tabla 2-2. Clasificación de los cementos de acuerdo a la norma NMX-C-414-ONNCE-2004. <sup>[19]</sup>

TIPO	DENOMINACION	CLASE RESISTENTE	CARACTERISTICAS ESPECIALES
<b>CPO</b>	Cemento Portland Ordinario	20	RS Resistente a los sulfatos
<b>CPP</b>	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA Baja reactividad álcali agregado
<b>CPEG</b>	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30R	BCH Bajo calor de hidratación
<b>CPC</b>	Cemento Portland Compuesto	40	B Blanco
<b>CPS</b>	Cemento Portland con Humo de sílice	40R	
<b>CEG</b>	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		

Según las necesidades del proyecto los cementos pueden requerir de una o más características especiales.

Los cementos se designan por uno de los 6 tipos de cementos, seguido por la clase de resistencia y por la característica especial:

**Composición + Resistencia + característica especial <sup>[19]</sup>**

Además de estos cementos, aún están disponibles en el mercado mexicano, el cemento para servicios de albañilería y el cemento para cementaciones de pozo de petróleo tipo G (según la norma NMX – C – 315). <sup>[11]</sup>

La ASTM C 150/C150M-12, Especificaciones de Norma para el Cemento Portland, designa los siguientes tipos de cemento, usando los números romanos (tabla 2-3), como sigue <sup>[19]</sup>:

Tabla 2-3. Tipos de cementos de acuerdo a la ASTM C 150/C150M-12. [19]

NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICAS
Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal con aire incluido
Tipo II	Moderada resistente a los sulfatos
Tipo IIA	Moderada resistente a los sulfatos con aire incluido
Tipo II (MH)	Moderada calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos.
Tipo II (MH)A	Con aire incluido con moderada calor de hidratación y resistencia a los sulfatos
Tipo III	Alta resistencia inicial (alta resistencia temprana)
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
Tipo IV	Bajo calor de hidratación
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos

### 2.1.4 Usos de Cementos

**Cemento Portland Normal, Común u Ordinario.** Éste es un cemento para uso general, empleado cuando no sean necesarias propiedades especiales. Pero a este cemento se pueden añadir características especiales como en Argentina donde puede tener alta resistencia inicial, moderada o alta resistencia a los sulfatos, en Colombia donde puede tener alta resistencia, en México donde puede tener resistencia a sulfatos, baja reactividad álcali-agregado, bajo calor de hidratación o blanco y en Perú donde puede presentar bajo contenido de álcalis. Se le puede utilizar en concreto armado, pavimentos, prefabricados, mampostería, concreto postensado y concreto pretensado.

**Moderada Resistencia a los Sulfatos.** Ha sido diseñado para estructuras que necesiten moderada resistencia a los sulfatos o bajo calor de hidratación. Se recomienda en edificios y construcciones industriales, puentes, estructuras expuestas a suelos agresivos, al agua con concentración moderada de sulfatos o al agua del mar o estructuras con gran volumen de concreto.

**Alta Resistencia Inicial.** Normalmente se lo conoce como ARI. La alta resistencia inicial de este cemento normalmente es resultado de la mayor área superficial Blaine y no de los productos de hidratación del C<sub>3</sub>A. En la mayoría de los países, este cemento se compone de

*Mauricio Arreola Sánchez*



clínker e yeso, pero en Costa Rica puede recibir también pequeñas cantidades de caliza. Se lo utiliza en estructuras de concreto que necesitan de alta resistencia a edades tempranas, tales como pavimentos “fast-track”, concreto prefabricado, concreto de alto desempeño, concreto colocado en tiempo frío, concreto postensado y concreto pretensado.

**Bajo Calor de Hidratación.** Esta es una propiedad encontrada en cementos indicados para estructuras de concreto masivo.

**Alta Resistencia a los Sulfatos.** Este cemento se usa cuando la estructura va a estar en contacto con ambientes con alto contenido de sulfatos solubles, tales como cimentaciones en suelos agresivos, pavimentos, estructuras en contacto con el agua del mar, plantas industriales, plantas de tratamiento de agua potable y de aguas residuales.

**Blanco.** Este cemento puede seguir los requisitos de otros cementos, por ejemplo del cemento portland común, pero diferenciándose en su color. Se lo utiliza en elementos prefabricados de concreto, concreto arquitectónico, pisos y acabado de fachadas.

**Cementos Portland Modificados.** Estos cementos se producen por la molienda conjunta del clínker y pequeñas cantidades de adiciones, tales como calizas, puzolanas y escorias. Son para uso general, cuando el concreto no necesite desarrollar alta resistencia inicial, a excepción del cemento ARI de Costa Rica.

Los *cementos portland con filler calcáreo* son cementos que reciben pequeñas cantidades de caliza. En Costa Rica y Venezuela el contenido de caliza es de hasta 15 %, en Bolivia hasta 15%, en Argentina hasta 20% y en Colombia hasta 30%, en masa.

En los *cementos portland modificados con escoria* se permiten cantidades mayores de adiciones: Argentina 35%, Chile 30% y Perú 25%.

En los *cementos portland modificados con puzolana* la cantidad de puzolana adicionada es de hasta 15% en Perú y hasta 30% en Chile, Bolivia y Venezuela.

**Cementos Portland Adicionados (Mezclados).** La diferencia entre un cemento adicionado y uno modificado es la mayor cantidad de adición mineral en los adicionados, la cual influye en las principales propiedades del concreto: menor calor de hidratación, desarrollo más lento de la resistencia, menor permeabilidad y mayor durabilidad.

El *cemento portland de escoria* se usa en construcciones en general, cuando sea necesaria resistencia a la reacción álcali-agregado o cuando se deseen baja permeabilidad y bajo calor de hidratación. Además, su uso es indicado en estructuras expuestas al agua del mar o a sulfatos. Ejemplos de empleo de este cemento son las presas y las estructuras de concreto

*Mauricio Arreola Sánchez*

masivo. Colombia es el país que permite el mayor contenido de escoria (85%), seguido de México y Paraguay (80%), Argentina y Chile (75%), Perú (70%) y Uruguay (65%).

El *cemento portland puzolánico* se usa en concretos expuestos a condiciones severas, tales como sulfatos y también cuando se van a emplear agregados potencialmente reactivos. El concreto expuesto al agua del mar y el concreto prefabricado sometido al curado térmico son ejemplos de utilización de este tipo de cemento. En Argentina, Chile, Colombia y México el contenido de puzolana puede llegar al 50% y en Bolivia, Perú, Uruguay y Venezuela al 40%.<sup>[11]</sup>

## 2.2 CONCRETO

Es una mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos que al endurecerse forman un sólido compacto que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión.<sup>[17]</sup>

### 2.2.1 Tipos y usos

En general existen tres tipos de concretos, los convencionales, los de alto desempeño y los concretos especiales. En seguida se describen los diferentes tipos:

**Concreto convencional:** Son concretos que poseen la capacidad de endurecer con el tiempo y adquirir características que lo hacen de uso más común en la construcción. En estado fresco permite el tiempo suficiente de manejabilidad. Se subdivide en tres tipos:

- De 5 kg/cm<sup>2</sup> a 70 kg/cm<sup>2</sup>, se utilizan para mejoramiento de suelos.
- De 105 kg/cm<sup>2</sup> a 210 kg/cm<sup>2</sup>, se utilizan en obras menores.
- De 245 kg/cm<sup>2</sup> a 385 kg/cm<sup>2</sup>, se utilizan en elementos estructurales.<sup>[20]</sup>

**Concreto de alto desempeño:** El concreto de alto desempeño (CAD) supera las propiedades y la constructibilidad del concreto convencional. Para producir estos concretos especialmente diseñados, se usan materiales normales y especiales y pueden ser necesarias prácticas especiales de mezclado, colocación (colado) y curado. Normalmente, un gran número de pruebas de desempeño es necesario para demostrar la satisfacción de las necesidades específicas del proyecto. El concreto de alto desempeño está siendo usado principalmente en túneles, puentes y edificios altos debido a su

resistencia, durabilidad y alto módulo de elasticidad. También se puede utilizar en reparaciones de concreto (concreto lanzado), postes, garajes y aplicaciones agrícolas.

Las características del concreto de alto desempeño se desarrollan para aplicaciones y ambientes particulares. Algunas de las propiedades que se pueden requerir incluyen:

- Alta resistencia
- Alta resistencia inicial
- Alto módulo de elasticidad
- Alta resistencia a abrasión
- Alta durabilidad y vida útil larga en ambientes severos
- Baja permeabilidad y difusión
- Resistencia al ataque químico
- Alta resistencia a la congelación y a los daños causados por las sales de deshielo
- Tenacidad y resistencia al impacto
- Estabilidad de volumen
- Fácil colocación
- Compactación sin segregación
- Cohibición del crecimiento de bacterias y moho

El concreto de alto desempeño casi siempre tiene mayor resistencia que el concreto normal. Sin embargo, la resistencia no siempre es la principal propiedad requerida. Por ejemplo, un concreto con resistencia normal con durabilidad bien alta y baja permeabilidad se lo considera con propiedades de alto desempeño.

La tabla 2-4 lista los materiales comúnmente usados en el concreto de alto desempeño y los motivos por los cuales se los selecciona. La tabla 2-5 lista las propiedades que se pueden seleccionar en el concreto de alto desempeño. No se pueden lograr todas las propiedades al mismo tiempo. Las especificaciones de concreto de alto desempeño idealmente deberían basarse en el desempeño. Infelizmente, muchas especificaciones son una combinación de requisitos de desempeño (tales como permeabilidad y límites de resistencia) y requisitos preceptivos (tales como límites de contenido de aire o dosis del material cementante).

Tabla 2-4. Materiales Usados en el Concreto de Alto Desempeño. [11]

<b>Material</b>	<b>Contribución principal/propiedad deseada</b>
Cemento portland	Material cementante/durabilidad
Cemento adicionado o mezclado	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Ceniza volante	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Escoria	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Humo de sílice	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Arcilla calcinada	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Metacaolinita	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Esquisto calcinado	Material cementante/durabilidad/alta resistencia
Superplastificante	Fluidez
Reductores de agua de alto rango	Reducción de la relación agua-cemento
Aditivos de control de hidratación	Control de fraguado
Retardadores	Control de fraguado
Aceleradores	Aceleración de fraguado
Inhibidores de corrosión	Control de la corrosión del acero
Reductores de agua	Reducción del contenido de cemento y de agua
Reductores de contracción	Reducción de la contracción
Inhibidores de RAS	Control de la reactividad álcali-sílice
Modificadores poliméricos/látex	Durabilidad
Agregado con granulometría optimizada	Mejoría de la trabajabilidad y reducción de la demanda de pasta

Tabla 2-5. Tipos y normas para concreto de alto desempeño. [11]

Propiedad	Método de ensayo	Criterio que se debe especificar
Alta resistencia	ASTM C 39 (AASHTO T 22), COVENIN 0338, IRAM 1546, NCh1037, NMX-C-083-1997-ONNCCE, NTC 673, NTE 1573, NTP 339.034, UNIT-NM 101	700 a 1400 kg/cm <sup>2</sup> o 70 a 140 MPa (10,000 a 20,000 lb/pulg <sup>2</sup> ) en el periodo de 28 a 91 días
Alta resistencia a compresión inicial	ASTM C 39 (AASHTO T 22), COVENIN 0338, IRAM 1546, NCh1037, NMX-C-083-1997-ONNCCE, NTC 673, NTE 1573, NTP 339.034, UNIT-NM 101	210 a 280 kg/cm <sup>2</sup> o 20 a 28 MPa (3000 a 4000 lb/pulg <sup>2</sup> ) en 3 a 12 horas o 1 a 3 días
Alta resistencia a flexión inicial	ASTM C 78 (AASHTO T 97), COVENIN 0342, IRAM 1547, NCh1038, NMX-C-191, NTC 2871, NTP 339.078, UNIT-NM 55	20 a 40 kg/cm <sup>2</sup> o 2 a 4 MPa (300 a 600 lb/pulg <sup>2</sup> ) en 3 a 12 horas o 1 a 3 días
Alta resistencia a abrasión	ASTM C 944	0 a 1 mm de profundidad de desgaste
Baja permeabilidad	ASTM C 1202 (AASHTO T 277)	500 a 2000 coulombs
Penetración de cloruros	AASHTO T 259 & T260	Menos de 0.07% Cl en 6 meses
Alta resistividad	ASTM G 59	
Baja absorción	ASTM C 642 y NMX-C-263	2% a 5%
Bajo coeficiente de difusión	La ASTM está desarrollando un método Wood, Wilson, y Leek (1989)	1000 x 10 <sup>-13</sup> m/s
Resistencia al ataque químico	Exposición del concreto a una solución saturada en ambiente húmedo/seco	Ningún deterioro después de 1 año
Ataque de sulfatos	ASTM C 1012, IRAM 1635, NMX-C-418, NTC 3330, NTP 334.094	Expansión máxima de 0.10% en 6 meses de exposición moderada a sulfatos o expansión máxima de 0.5% en 6 meses de exposición severa a sulfatos
Alto módulo de elasticidad	ASTM C 469, COVENIN 1468, NMX-C-128-1997-ONNCCE, NTC 4025, UNIT 42	Más de 400,000 kg/cm <sup>2</sup> o 40 GPa (5.0 millones de lb/pulg <sup>2</sup> )
Alta resistencia a congelación-deshielo	ASTM C 666, procedimiento A, COVENIN 1601, NCh2185, NMX-C-205	Factor de durabilidad de 95 a 100 en 300 a 1000 ciclos (también se puede especificar la máxima pérdida de masa o expansión)
Alta resistencia a sales de deshielo	ASTM C 672	Clasificación de 0 a 1 o pérdida de masa de 0 a 0.5 kg/m <sup>3</sup> después de 50 a 300 ciclos
Baja contracción	ASTM C 157, COVENIN 0346, IRAM 1597, NCh2221, NMX-C-173, NTC 3938	Menos de 400 millonésimos (Alicin 1998)
Baja fluencia	ASTM C 512	Menor que el concreto normal

**Concretos especiales:** Concretos especiales son aquéllos que tienen propiedades no ordinarias o aquéllos producidos por técnicas poco comunes. El concreto es, por definición, un material o compuesto, consistiendo básicamente en un medio aglomerante (aglutinante) y partículas de agregado y puede tomar varias formas. La Tabla 2-6 lista varios concretos especiales producidos con cemento portland y algunos elaborados con otros tipos de aglutinante. En muchos casos, la terminología de la lista describe el uso, propiedad o condición del concreto. No se presentan las marcas. [11]

Tabla 2-6. Diferentes tipos de concretos especiales. [11]

Algunos tipos de concreto producidos con cemento portland		
Concreto aislante	Concreto con revenimiento cero	Concreto modificado por látex
Concreto arquitectónico	Concreto con vermiculita	Concreto modificado por polímero
Concreto auto-compactante	Concreto de alta resistencia	Concreto para blindaje
Concreto blanco	Concreto de alta resistencia inicial	Concreto para clavar
Concreto celular de autoclave	Concreto de alto desempeño	Concreto para relleno
Concreto ciclópeo	Concreto de baja densidad	Concreto para tubo embudo (tremie)
Concreto colado por centrifuga	Concreto de contracción compensada	Concreto poroso
Concreto coloidal	Concreto de gran peso	Concreto pre-empacado
Concreto coloreado	Concreto de polvo reactivo	Concreto premoldeado
Concreto compactado con rodillo	Concreto empacado a seco	Concreto reciclado
Concreto con agregado de aserrín	Concreto estampado	Concreto reforzado con fibras
Concreto con agregado expuesto	Concreto fluido	Concreto superplastificado
Concreto con agregado pre-colocado	Concreto geopolímero	Concreto tratado al vacío
Concreto con ceniza volante	Concreto lanzado	Ferrocemento
Concreto con granulometría discontinua	Concreto ligero de resistencia moderada	Relleno de densidad controlada
Concreto con humo de silice	Concreto ligero estructural	Relleno fluido
Concreto con puzolana	Concreto masivo	Suelo-cemento
Concreto sin revenimiento	Concreto modificado por epóxi	Terrazo
Algunos tipos de concreto que no usan cemento portland		
Concreto acrílico	Concreto de fosfato de magnesio	Concreto de silicato de sodio
Concreto asfáltico	Concreto de látex	Concreto de yeso
Concreto de aluminato de calcio	Concreto de metacrilato de metilo (MMA)	Concreto epóxico
Concreto de azufre	Concreto de poliéster	Concreto furano
Concreto de fosfato de aluminio	Concreto de silicato de potasio	Concreto polimérico

**Morteros:** Es un concreto cuyo aporte de agregado está hecho por una combinación de arena y polvo piedra. Se usa para para juntas de unión en bloques de concreto, repello de paños de mampostería y como mortero lanzado. Algunas de sus ventajas son: Resistencia a la compresión garantizada, facilidad de manejo, conserva sus propiedades por un tiempo prolongado, reducción de desperdicios. En la tabla 2-7 se muestran algunas características de dichos morteros manejados por la cementera Cemex. [21]

Tabla 2-7. Características de morteros premezclados.

Tipo de concreto	Morteros	Unidades
Resistencias	80,100, 120, 140,175,210, 245,280	kg/cm <sup>2</sup>
Edades	7, 14 y 28	días
Tamaño máximo del agregado	3/8" (9 mm)	Pulgadas
Tiempo de manejabilidad	90	minutos
Extensibilides de diseño	10, 12, 15, 20	cm
Tiempo de fraguado	Inicial: 3.0-4.0, Final:7.5-8.5	horas
Densidad	2300 a 2450	kg/m <sup>3</sup>
Contenido de aire	Máximo 3.5	%
Relación A/C	0.65-0.45	adim

### **2.2.2 Criterios de diseño**

El proceso de determinación de las características requeridas del concreto y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla. Las características pueden incluir: Propiedades del concreto fresco, propiedades mecánicas del concreto endurecido y la inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos. El diseño de la mezcla lleva al desarrollo de la especificación del concreto.

El proporcionamiento (dosificación) de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las características especificadas. Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido
- Economía

Es importante el entendimiento de los principios básicos del diseño de mezclas, tales como los cálculos usados para establecer las proporciones de la mezcla. Las cualidades citadas arriba se pueden alcanzar en las construcciones en concreto sólo con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla.

#### **Selección de las características de la mezcla**

Antes que se pueda determinar las proporciones de la mezcla, se seleccionan sus características considerando el uso que se propone dar al concreto, las condiciones de exposición, tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto (tales como resistencia a la congelación y resistencia mecánica) requeridas para la estructura. Las características deben reflejar las necesidades de la estructura, por ejemplo, se debe verificar la resistencia a los iones cloruros y se deben especificar los métodos de ensayos apropiados.

Después que se hayan elegido las características, se puede proporcionar (dosificar) la mezcla a partir de datos de campo o de laboratorio. Como la mayoría de las propiedades deseadas en el concreto endurecido dependen principalmente de la calidad de la pasta cementante, la primera etapa para el proporcionamiento del concreto es la elección de la relación agua-material cementante (ligante) apropiada para la resistencia y durabilidad necesarias.

### **Resistencia y Relación Agua-Material Cementante**

La resistencia (compresión o flexión) es el indicador de la calidad del concreto más universalmente utilizado. A pesar de ser una característica importante, otras propiedades, tales como durabilidad, permeabilidad y resistencia al desgaste se reconocen hoy en día como de igual importancia o, en algunos casos, de mayor importancia, especialmente cuando se considera la vida útil de la estructura.

Dentro del rango normal de resistencias usadas en la construcción de concreto, la resistencia es inversamente proporcional a la relación agua-cemento o agua-material cementante (ligante). Para concretos totalmente compactados, producidos con agregados limpios y sanos, la resistencia y otras propiedades requeridas del concreto, bajo las condiciones de obra, se gobiernan por la cantidad del agua de mezcla usada por unidad de cemento o material cementante.

La resistencia de la pasta cementante en el concreto depende de la calidad y de la cantidad de componentes reactivos en la pasta y de su grado de hidratación. El concreto se vuelve más resistente con el tiempo, siempre que la temperatura y la humedad disponibles sean adecuadas. Por lo tanto, la resistencia en cualquier edad es función tanto de la relación agua-material cementante original y del grado de hidratación del material cementante. La importancia del curado temprano y minucioso se reconoce fácilmente.

### **Agua-Material Cementante**

La relación agua-material cementante (ligante) es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante (cemento portland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas naturales). La relación agua-material cementante elegida para un diseño de mezcla debe ser el menor valor necesario para resistir a las condiciones de exposición anticipadas. Cuando la durabilidad no es el factor que gobierne, la elección de la relación agua-material cementante se debe basar en los requisitos de resistencia a compresión. En estos casos, la relación agua-material cementante y las proporciones de la mezcla para la resistencia requerida se deben basar en datos de campo adecuados o en mezclas de prueba que empleen los materiales de la obra, a fin de que se determine la relación entre la resistencia y la relación agua-material cementante (ligante).

En el diseño de mezclas, la relación agua-material cementante,  $a/mc$ , se usa frecuentemente como sinónimo de la relación agua-cemento ( $a/c$ ). Sin embargo, algunas

*Mauricio Arreola Sánchez*



especificaciones diferencian las dos relaciones. Tradicionalmente, la relación agua-cemento se refiere a la relación agua-cemento portland o agua-cemento adicionado. <sup>[11]</sup>

Con lo anterior se pueden distinguir dos criterios de diseño, por resistencia y por durabilidad. Siendo el factor común la relación agua/material cementante.

### **2.2.3 Durabilidad del concreto**

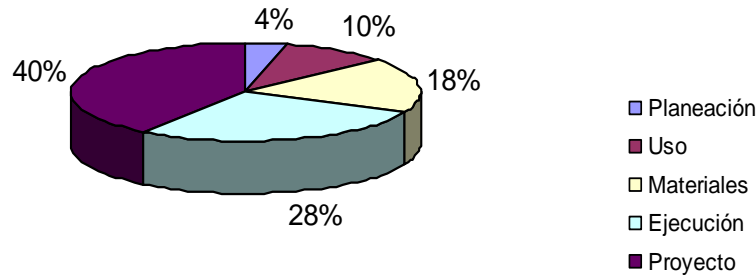
El concreto de cemento Portland ha probado ser el material de construcción más adecuado para las estructuras, superando con grandes ventajas otras alternativas viables, como madera, acero o albañilería.

Desde los inicios del empleo del concreto armado, en mediados del siglo XIX, los edificios, las obras de arte, las carreteras, los canales, las presas y tantas otras construcciones civiles en concreto simple, armado o pretensado han resistido las más variadas sobrecargas y acciones del medio ambiente.

No obstante el concreto pudiera ser considerado un material prácticamente eterno - siempre que reciba un mantenimiento sistemático y programado - hay construcciones que presentan manifestaciones patológicas de significativa intensidad e incidencia, acompañadas de elevados costos para su rehabilitación. Siempre hay comprometimiento de los aspectos estéticos y en la mayoría de los casos, reducción de la capacidad resistente, pudiéndose llegar en ciertas situaciones, al colapso parcial o total de la estructura.

Los problemas patológicos sólo se manifiestan durante la construcción o después de la ejecución propiamente dicha, última etapa de la fase de producción. Normalmente ocurren con mayor incidencia en la etapa de uso.

Un elevado porcentaje de las manifestaciones patológicas tiene origen en las etapas de planeamiento y proyecto, como se muestra en la gráfica 5. Las fallas de planeamiento y proyecto son en general más graves que las fallas de calidad de los materiales o de mala ejecución. Es siempre preferible invertir más tiempo en el detallamiento del diseño de la estructura, que por falta de previsión, tomar decisiones apresuradas y adaptadas durante la ejecución.



Gráfica 2-1. Origen de los problemas patológicos con relación a las etapas de producción y uso de las obras civiles. [23]

Dividiendo las etapas constructivas y de uso en cuatro períodos, correspondientes al de diseño, al de ejecución propiamente dicha, al del mantenimiento preventivo efectuado antes de los cinco primeros años, y al del mantenimiento correctivo efectuado posterior al surgimiento de los problemas, a cada uno corresponderá un costo que sigue una progresión geométrica de razón cinco, conforme presentado en la gráfica 6.



Gráfica 2-2. Ley de evolución de los costos, ley de Sitter. [23]

Una interpretación adecuada de cada uno de estos períodos o etapas de obra puede ser la que sigue:

**Proyecto:** toda medida tomada en el ámbito de diseño con el objetivo de aumentar la protección y durabilidad de la estructura, por ejemplo, aumentar el espesor del recubrimiento de la armadura, reducir la relación agua / cemento del hormigón, especificar tratamientos protectores superficiales, escoger detalles constructivos adecuados, especificar cementos, aditivos y adiciones con características especiales y otras, implica un costo que podemos asociar al número 1 (uno).

**Ejecución:** toda medida fuera del proyecto, tomada durante la ejecución propiamente dicha, incluyendo en ese período la obra recién construida, implica un costo 5 (cinco) veces superior al costo que se hubiese ocasionado si esta medida hubiera sido tomada en el ámbito de diseño, para lograr el mismo “grado” de protección y durabilidad de la estructura.

**Mantenimiento preventivo:** toda medida tomada con antelación y previsión, durante el periodo de uso y mantenimiento de la estructura, puede ser asociada a un costo 5 (cinco) veces menor que aquel necesario para la corrección de los problemas generados a partir de una intervención no prevista tomada ante una manifestación explícita e irreversible de patología. Al mismo tiempo estará asociada a un costo 25 (veinticinco) veces superior a aquel que habría ocasionado una decisión de proyecto para la obtención del mismo “grado” de protección y durabilidad de la estructura.

**Mantenimiento correctivo:** corresponde a los trabajos de diagnóstico, pronóstico, reparación y protección de las estructuras que ya presentan manifestaciones patológicas, o sea, corrección de problemas evidentes. A estas actividades se les puede asociar un costo 125 (ciento y veinticinco) veces superior al costo de las medidas que podrían haber sido tomadas en el ámbito de proyecto y que redundarían en un mismo “grado” de protección y durabilidad que se estime de la obra a partir de la corrección.<sup>[22]</sup>

La durabilidad del hormigón es una de sus propiedades más importantes porque el hormigón debe ser capaz de soportar las condiciones para las que ha sido diseñado a lo largo de la vida de una estructura.

#### **2.2.4 Mecanismos y factores de degradación**

La falta de durabilidad puede ser causada por agentes externos derivados del medio ambiente o por los agentes internos dentro del hormigón. Las causas pueden ser categorizadas como físicas, mecánicas y químicas.

Las causas físicas surgen de la acción de las heladas y de las diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento, mientras que las causas mecánicas están asociadas principalmente a la abrasión.

Las causas químicas: ataque por sulfatos, ácidos, agua de mar, y también por los cloruros, que inducen la corrosión electroquímica del acero de refuerzo. Dado que este ataque se lleva a cabo dentro de la masa de hormigón, el agente atacante debe ser capaz de penetrar en todo el hormigón, que por consiguiente tiene que ser permeable. La

permeabilidad es, por lo tanto, de interés crítico. El ataque es ayudado por el transporte interno de los agentes por difusión debido a gradientes internos de la humedad y de la temperatura y por ósmosis.<sup>[23]</sup>

**Permeabilidad:**

La permeabilidad es la facilidad con que los líquidos o gases pueden viajar a través del hormigón. Esta propiedad es de interés en relación a la estanqueidad al agua de las estructuras de retención de líquido y al ataque químico.

Aunque no hay pruebas prescritas por la norma ASTM un bs, la permeabilidad del hormigón se puede medir por medio de una simple prueba de laboratorio, pero los resultados son principalmente comparativos.

La permeabilidad del hormigón al aire u otros gases es de interés en estructuras tales como tanques de aguas residuales y purificadores de gas, y en recipiente a presión en los reactores nucleares. Para el concreto hecho con agregado habitual de peso normal, la permeabilidad se rige por la porosidad de la pasta de cemento, pero la relación no es simple ya que la distribución de tamaño de poro es un factor. Por ejemplo, a pesar de que la porosidad del gel de cemento es de 28 por ciento, su permeabilidad es muy baja, debido a la extremadamente fina textura del gel y el tamaño muy pequeño de los poros del gel. La permeabilidad de la pasta de cemento hidratado en su conjunto es mayor debido a la presencia de grandes poros capilares, y, de hecho, su permeabilidad es generalmente una función de la porosidad capilar. Ya que porosidad capilar está gobernado por la relación agua / cemento y por el grado de hidratación, la permeabilidad de la pasta de cemento también depende principalmente de estos parámetros.

La gran influencia de la segmentación de los capilares en la permeabilidad ilustra (imagen 2-3) el hecho de que la permeabilidad no es una función simple de porosidades pero con diferentes permeabilidades. De hecho, sólo un gran paso que conecta los poros capilares dará lugar a una gran permeabilidad, mientras que la porosidad se mantendrá prácticamente sin cambios.

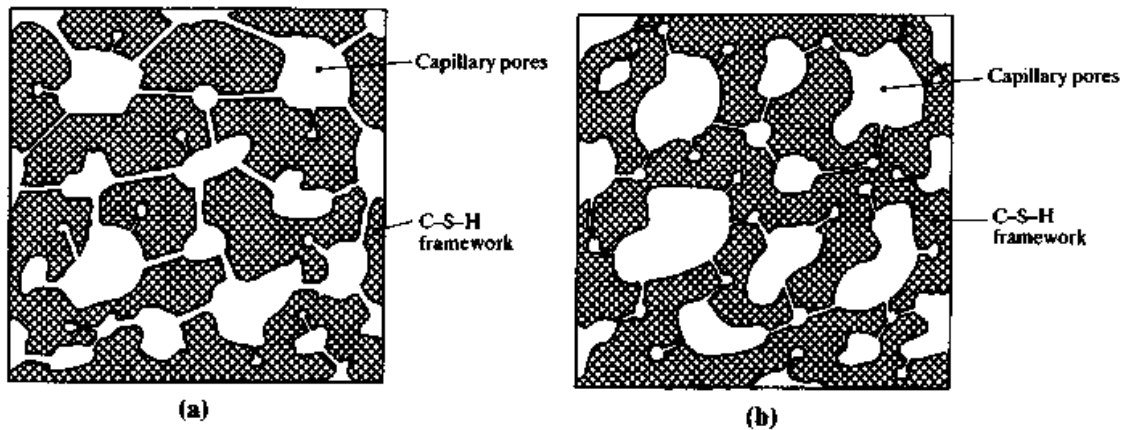


Imagen 2-3. Segmentos de poros capilares. [23]

Desde el punto de vista de la durabilidad, que puede ser importante para conseguir una baja permeabilidad tan rápidamente como sea posible. Por consiguiente, una mezcla con una baja relación agua/cemento es ventajoso debido a que la etapa en la que los capilares convertirse segmentado se consigue después de un período más corto de curado húmedo. [23]

### Sulfatos y Cristalización de Sales

Muchos sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un concreto que no fue adecuadamente diseñado. Los sulfatos (por ejemplo sulfato de calcio, sulfato de sodio y sulfato de magnesio) pueden atacar un concreto pues reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en desintegración del concreto (pérdida de cohesión de la pasta y de resistencia). El sulfato de calcio ataca el aluminato de calcio hidratado y forma etringita. El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado, formando etringita e yeso. El sulfato de magnesio ataca, de manera similar, al sulfato de sodio y forma etringita, yeso y también brucita (hidróxido de magnesio). La brucita se forma primeramente en la superficie del concreto, consume el hidróxido de calcio, baja el pH en la solución de los poros y entonces descompone el silicato de calcio hidratado.

La taumasita se puede formar durante el ataque de sulfato en condiciones de humedad con temperatura entre 0°C y 10°C y ocurre como resultado de la reacción entre silicato de calcio hidratado, sulfato, carbonato de calcio y agua. En los concretos, donde el deterioro está asociado al exceso de taumasita, las fisuras se pueden llenar de taumasita y un halo

de taumasita blanca puede encontrarse alrededor de los agregados. En la superficie entre el concreto y el suelo, la superficie del concreto puede ser “mole” con total sustitución de la pasta de cemento por taumasita.

Como en las rocas naturales, tales como en las piedras calizas, el concreto poroso está susceptible al ataque de las intemperies causado por cristalización de sales. Estas sales pueden o no contener sulfatos y pueden o no reaccionar con los compuestos hidratados en el concreto. Algunas sales conocidas por causar deterioro en concreto son el carbonato de sodio y sulfato de sodio (los estudios de laboratorio también relataron soluciones saturadas de cloruro de calcio y otras sales como responsables por el deterioro de concreto). El mayor daño ocurre con el secado de las soluciones saturadas de estas sales, normalmente en ambientes con ciclos de cambios de humedad relativa y de temperatura que alteran las fases mineralógicas. En concretos permeables, expuestos a condiciones de secado, las soluciones de sales pueden ascender hacia la superficie por la acción de los capilares y, posteriormente, – como resultado de la evaporación en la superficie – la fase de solución se vuelve supersaturada y la cristalización de la sal ocurre, algunas veces generando presiones suficientes para causar la fisuración. Ambas, las partículas de agregado y la pasta de cemento pueden ser atacadas por sales. El ataque de sulfatos y la cristalización de sales son más severos donde el concreto está expuesto a ciclos de mojado y secado, que donde el concreto está constantemente mojado. <sup>[11]</sup>

### **Ataque por agua de mar**

El agua de mar contiene sulfatos y podría esperarse que ataquen de manera similar a lo descrita anteriormente pero, ya que también están presentes cloruros, el ataque de agua de mar no causa generalmente expansión del hormigón. La explicación radica en el hecho de que el yeso y etringita son más solubles en una solución de cloruro que en agua, lo que significa que puede ser más fácilmente lixiviados hacia fuera por el agua de mar. En consecuencia, no hay ninguna interrupción pero solamente un aumento muy lento en la porosidad y, por lo tanto una disminución de la fuerza. <sup>[23]</sup>

El concreto se ha usado en ambientes marinos por décadas con buen desempeño. Sin embargo, son necesarios cuidados especiales en el diseño de las mezclas y en la selección de los materiales para estos ambientes severos. Una estructura expuesta al agua del mar o la salpicadura del agua del mar es más vulnerable en la zona de marea o salpicadura, donde hay ciclos repetidos de mojado y secado y/o congelamiento y deshielo. Los sulfatos y los cloruros presentes en el agua del mar requieren el uso de concretos de baja

permeabilidad para minimizar la corrosión de la armadura (refuerzo) y el ataque de sulfatos. <sup>[11]</sup>

### **Ataque por ácidos**

No hay cemento Portland resistente al ataque de ácidos. En condiciones húmedas, el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), así como algunos otros gases en la atmósfera, forma ácidos que ataque concreto mediante la disolución y eliminación de una parte, de la pasta de cemento hidratado y dejar una masa suave y muy débil. Esta forma de ataque se encuentra en varias condiciones industriales, tales como chimeneas y en algunas condiciones agrícolas, tales como pisos de industrias lácteas.

En la práctica, el grado de ataque aumenta a medida que aumenta de acidez; el ataque se produce en los valores de ph por debajo de 6.5, un ph de menos de 4,5 es ataque severo. La tasa de ataque también depende de la habilidad de los iones de hidrógeno para ser difundidos a través del gel de cemento (C-S-H) después de que el Ca(OH)<sub>2</sub> se ha disuelto y lixiviado hacia fuera.

Aunque de naturaleza alcalina, las aguas residuales domésticas causan deterioro de alcantarillas, especialmente con temperaturas bastante altas, cuando los compuestos de azufre en las aguas residuales son reducidos por las bacterias anaerobias a H<sub>2</sub>S. Esto no es un agente destructivo en sí mismo, pero se disuelve en películas de humedad sobre superficie expuesta del concreto y sufre oxidación por las bacterias anaerobias, finalmente produciendo ácido sulfúrico. El ataque se produce, por lo tanto, por encima del nivel del flujo de las aguas residuales. El cemento se disuelve gradualmente y un deterioro progresivo de hormigón se lleva a cabo. <sup>[23]</sup>

### **Reactividad Álcali-Agregado**

La reactividad álcali-agregado es un tipo de deterioro que ocurre cuando los constituyentes minerales activos de algunos agregados reaccionan con los hidróxidos de los álcalis en el concreto. La reactividad es potencialmente peligrosa sólo cuando produce expansión considerable. La reactividad álcali-agregado ocurre de dos formas – reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC). La reacción álcali-sílice es más preocupante que la reacción álcali-carbonato pues es más común la ocurrencia de agregados conteniendo minerales de sílice. <sup>[11]</sup>

La reacción álcali-sílice (ASR) es la más común y estudiada de las reacciones álcali-árido.

En la fabricación del concreto, la hidratación del Pórtland da como resultado una solución intersticial que contiene hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución. La reacción álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los poros del concreto y los minerales silíceos de algunos áridos reaccionan para formar un gel, que al embeber agua, aumenta de volumen (figura 1).

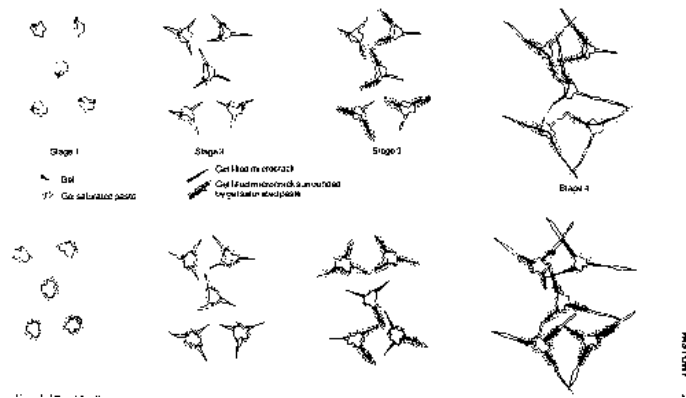


Imagen 2- 4. Modelo idealizado de cómo pueden inducirse las fisuras causadas por la reacción álcali-sílice. [24]

Para que se dé la reacción álcali-sílice, es necesaria la presencia de sílice reactiva, álcalis sodio y potasio, y agua. Pero para que la reacción además produzca fisuración y expansión se requiere que las cantidades tanto de sílice reactiva como de álcalis disponibles, sean significativas y que el agua provenga de una fuente externa.

La reacción cesará pues cuando uno de los reactivos se consume o cuando la concentración de ión hidroxilo es tan baja que la sílice reactiva no es atacada. [24]

Las manifestaciones de la presencia de reactividad álcali-agregado son red de agrietamiento, juntas cerradas o lascadas o dislocación de diferentes partes de la estructura. Como el deterioro por reactividad álcali-agregado es un proceso lento, el riesgo de rotura catastrófica es bajo. La reacción álcali-agregado puede causar problemas de utilización (servicio, funcionalidad) y empeorar otros mecanismos de deterioro, como aquellos de la exposición a congelamiento, anticongelantes o sulfatos. [11]

Las formas reactivas de sílice son opal (amorfo), calcedonia (criptocristalina fibrosa) y tridimita (cristalino). Estos materiales se encuentran en varios tipos de rocas: cherts opalinos o calcedonia, calizas silíceas, riolitas y filitas. [23]



### **Resistencia a los Cloruros y Corrosión de la Armadura**

El concreto protege a la armadura (refuerzo) embebida de la corrosión, debido a su alta alcalinidad. El ambiente de pH alto en el concreto (normalmente mayor que 12.5) promueve la pasivación y la formación sobre el acero de una película de protección de óxido no corrosivo. Sin embargo, la presencia de iones de cloruros de los anticongelantes y del agua del mar puede destruir o penetrar en la película. Cuando se alcanza el límite de corrosión por cloruros (aproximadamente 0.15% cloruro solubles en agua por peso de cemento), una célula eléctrica se forma a lo largo del acero y entre las barras de acero y el proceso electroquímico de la corrosión empieza. Algunas regiones del acero a lo largo de las barras se vuelven en ánodos, descargando corriente en la célula eléctrica; y de allá el hierro entra en solución. Las áreas del acero que reciben corriente son los cátodos donde los iones de hidróxido se forman.

Los iones de hierro e hidróxido forman el hidróxido de hierro,  $\text{FeOH}$ , el cual más tarde se oxida, formando polvo (óxido de hierro). La formación de polvo es un proceso expansivo – el polvo se expande hasta cuatro veces su volumen original – el cual induce a la formación de tensiones internas y descascaramientos o descascarillados del concreto sobre el acero de refuerzo. El área de la sección transversal del acero también se puede reducir considerablemente.

Una vez que empieza, la tasa (velocidad) de corrosión del acero es influenciada por la resistividad eléctrica del concreto, la humedad y la tasa de migración del oxígeno del concreto hacia el acero. Los iones de cloruro pueden también penetrar en la capa pasivadora del refuerzo; éstos se combinan con los iones de hierro, formando un compuesto de cloruro de hierro soluble, el cual lleva el hierro para dentro del concreto para más tarde oxidarse (polvo).

### **Carbonatación**

La carbonatación del concreto es un proceso por el cual el dióxido (bióxido) de carbono del aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos, tales como los hidróxidos de calcio para formar carbonatos. En la reacción con el hidróxido de calcio hay formación de carbonato de calcio. La carbonatación y el secado rápido del concreto fresco pueden afectar la durabilidad de la superficie, pero esto se puede evitar con el curado adecuado. La carbonatación del concreto endurecido no hace daño a la matriz del concreto. Sin embargo, la carbonatación reduce considerablemente la alcalinidad (pH) del concreto. La alta alcalinidad es necesaria para la protección de la armadura (refuerzo) contra la

*Mauricio Arreola Sánchez*

corrosión y, por consiguiente, el concreto debe ser resistente a la carbonatación para prevenirse la corrosión del acero de refuerzo.

Se aumenta considerablemente el grado de la carbonatación en el concreto que tiene alta relación agua-cemento, bajo contenido de cemento, corto periodo de curado, baja resistencia y pasta altamente permeable (porosa).

### **Resistencia al Congelamiento y Deshielo**

Se espera que el concreto empleado en estructuras y pavimentos tenga una vida larga y poco mantenimiento. El concreto debe tener una buena durabilidad para resistir a condiciones de exposición anticipadas. El factor de intemperismo potencialmente más destructivo es la congelación y deshielo (hielo-deshielo) mientras el concreto está húmedo, principalmente en la presencia de anticongelantes (descongelantes).

El deterioro es causado por la congelación del agua y su posterior expansión en la pasta, agregado o ambos. Cuando la congelación ocurre en el concreto que contiene agregado saturado, presiones hidráulicas perjudiciales se pueden crear también en el agregado. El agua, desplazada de las partículas de agregado durante la formación del hielo, no se puede escapar hacia la pasta circundante suficientemente rápido para el alivio de presión. Sin embargo, para la mayoría de las condiciones de exposición, una pasta de buena calidad (baja relación agua-cemento) va a prevenir la saturación de la mayoría de los agregados.

### **2.2.5 Métodos de prevención**

Como ya se mencionó en al inicio de este capítulo, la forma de prevenir los efectos nocivos de los mecanismo de degradación del concreto y mortero, es la utilización de criterios de durabilidad en la etapa de proyecto de la mezcla y/o estructura. <sup>[11]</sup>

En la actualidad, se considera que los concretos de baja permeabilidad, es decir, con baja relación agua-cemento, bien compactados y bien curados, son poco susceptibles de ser atacados por sulfato y los casos reales documentados de deterioro corresponden a hormigones porosos y con deficiencias de curado. <sup>[22]</sup>

Los cementos con contenido de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) del 4% al 10% ofrecen protección satisfactoria contra el ataque de sulfatos del agua del mar, bien como protección contra la corrosión de la armadura por cloruros. Se debe garantizar un cubrimiento adecuado sobre el refuerzo (ACI 318). La relación agua/material cementante no debe exceder 0.40. En climas más fríos, el concreto debe contener un mínimo del 6%

*Mauricio Arreola Sánchez*

de aire incluido. El concreto de alta resistencia se puede utilizar donde las grandes formaciones de hielo desgastan la estructura.

Con el empleo de aire incluido, el concreto es altamente resistente a este tipo de deterioro. Durante la congelación, el agua desplazada por la formación de hielo en la pasta se acomoda, no siendo perjudicial; las burbujas microscópicas de aire en la pasta ofrecen cámaras para que el agua entre y entonces alivíese la presión hidráulica generada.<sup>[11]</sup>

Para el caso del ataque por ácidos, el ataque de  $\text{Ca(OH)}_2$  puede prevenirse o reducirse mediante su fijación. Esto se logra mediante el tratamiento con vaso de agua diluida (silicato de sodio) para formar silicatos de calcio en los poros. Tratamiento superficial con brea de alquitrán de hulla, de caucho o pinturas bituminosas, resinas epoxi, y otros agentes que también se han utilizado con éxito. El grado de protección alcanzado por los diferentes tratamientos varía, pero en todos los casos es esencial que la capa protectora se adhiera bien al hormigón y permanezca sin daños por las agentes mecánicas.<sup>[23]</sup>

Las prácticas corrientes para el control de la reacción álcali-sílice incluyen el uso de materiales cementantes suplementarios o cementos adicionados. Estos materiales han sido verificados y comprobadamente pueden controlar la reacción álcali-sílice. Los materiales cementantes suplementarios incluyen cenizas volantes, escoria granulada de alto horno, sílice activa (humo de sílice, microsílice) y puzolanas naturales.

Los cementos adicionados también contienen estos materiales para el control de la reactividad álcali-sílice. Esta práctica permite el uso de agregados y materiales cementantes disponibles en la región. La reducción del contenido de álcalis en el concreto también puede controlar la reacción.

La resistencia del concreto a los cloruros es buena, pero se la puede mejorar con una baja relación agua-cemento (0.40), por lo menos siete días de curado y el uso de materiales cementantes suplementarios, tales como cenizas volantes, para reducirse la permeabilidad. El aumento del recubrimiento encima del acero también reduce la migración de cloruros.

Otros métodos de reducción de corrosión de acero incluyen el uso de aditivos inhibidores de corrosión, acero revestido con epoxi, tratamientos de superficie, revestimiento del concreto y protección catódica.<sup>[11]</sup>

Siguiendo las prácticas estándar para producir concreto de baja permeabilidad se puede prevenir también la carbonatación. Éstas incluyen relaciones bajas de agua/cemento, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas tales como ceniza volante o humo de sílice y curado apropiado. Todas estas prácticas reducen la permeabilidad del concreto y hacen más difícil para que el dióxido de carbono se difunda a través de él. <sup>[25]</sup>

## 2.3 Morteros

El mortero se puede definir como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland y/o otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, que al endurecer presentan propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y es ampliamente utilizado para las siguientes funciones:

- Unir los elementos de mampostería.
- Servir como material de asentamiento para dichos elementos.
- Nivelar y asentar los elementos.
- Proporcionar cualidades estéticas a la estructura. <sup>[26]</sup>

A diferencia del concreto, la resistencia a la compresión no es la propiedad más importante del mortero. Otras propiedades importantes del mortero son la facilidad del trabajo, la resistencia a la tracción, la resistencia a la congelación y la descongelación, y la retención de agua. <sup>[27]</sup>

### 2.3.1 Tipos y usos

Los morteros se clasifican de acuerdo al tipo de fraguado o según su tipo de composición:

**Mortero físico.** El paso del estado pastoso o semilíquido a un sólido se presenta mediante el secado o fraguado que se da sin recursos químicos, esto puede aplicarse a los morteros de barro, morteros de suelo refractario, morteros de asfalto y los modernos morteros con adhesivos a base de materiales sintéticos.

**Mortero químico.** El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química, por ejemplo en este tipo de mortero se cuenta con los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial. Las mezclas entre estos tipos de morteros y el empleo de distintos aditivos también se hacen frecuentes.

**Mortero aéreo.** Es aquel que fragua al contacto con el aire, como los morteros de arcilla, yeso y cal hidratada.

**Mortero bituminoso.** Son los morteros en los cuales se emplean emulsiones asfálticas o cemento asfáltico para su elaboración.

**Mortero hidráulico.** Tiene la propiedad de endurecer rápidamente, además tiene las propiedades de fraguar en contacto con el agua o en presencia de humedad como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento. <sup>[28]</sup>

Los morteros de cemento Portland se elaboran con arena, agua y cemento Portland. Los morteros se han empleado tradicionalmente para pegar tabiques y en todo tipo de aplanados en muros y techos, sin embargo existen muchas otras aplicaciones en la ingeniería civil que tienen que ver con la necesidad de colocar un material de textura lo suficientemente fina para poder penetrar en pequeños resquicios ya sea para sellar, resanar o nivelar con mucha mayor facilidad de lo que es posible de hacer con los concretos. Debido a que los morteros no llevan grava son más fáciles de manejar y se consume menos energía en su mezclado y colocación, ya sea manual o por medios mecánicos.

Como se ha mencionado, para hacer un mortero se requiere cemento, arena y agua, estos ingredientes básicos se manejan en proporciones adecuadas según las necesidades de fluidez y resistencia. <sup>[29]</sup>

### **Cementos de Albañilería (Mampostería) y Cementos Mortero**

Los cementos de albañilería y los cementos mortero son cementos hidráulicos diseñados para que se empleen en morteros en la construcción de mampostería. Consisten en una mezcla de cemento portland, cemento hidráulico adicionado y materiales plastificantes (tales como caliza o cal hidratada), junto con otros materiales introducidos para mejorar una o más propiedades, tales como tiempo de fraguado, trabajabilidad, retención de agua y durabilidad. Se proporcionan y se empacan estos componentes en la planta de cemento bajo condiciones controladas para que se garantice la uniformidad del desempeño.

Los cementos de albañilería satisfacen a los requisitos de la ASTM C 91, la cual clasifica los cementos de albañilería como tipo N, Tipo S y tipo M. El cemento blanco de albañilería y el cemento colorido de albañilería están de acuerdo con la ASTM C 91 y están disponibles en algunas regiones. Los cementos mortero siguen los requisitos de la norma ASTM C 1329, la cual también clasifica los cementos para mortero en tipo N, tipo S y tipo M.

El aumento del uso de mamposterías en aplicaciones con exigencias estructurales, tales como áreas con actividad sísmica, resultó en el desarrollo del cemento para mortero.

El cemento para mortero es similar al cemento de albañilería en el sentido de que es un cemento preparado industrialmente y usado principalmente para la producción de morteros para mamposterías. La ASTM C 1329 pone límites máximos de contenido de aire inferiores en el cemento para mortero que los límites permitidos para los cementos de albañilería; además, la ASTM C 1329 es la nica especificación de la ASTM para materiales de mampostería que incluye un criterio de desempeño para la resistencia de adherencia.

Los cementos de albañilería y los cementos mortero no sólo se emplean en la construcción de mamposterías (tabla 2-8). Los cementos de albañilería se emplean también en revoque y estuco a base de cemento portland. <sup>[11]</sup>

Tabla 2-8. Aplicaciones de cementos especiales. <sup>[11]</sup>

Cemento especial	Tipo	Aplicación
Cemento Blanco, ASTM C 150	I, II, III, V	Concreto blanco o colorido, mampostería, mortero, lechada, revoque y estuco
Cemento blanco de albañilería, ASTM C 91	M, S, N	Mortero blanco entre las unidades de mampostería
Cementos de Albañilería, ASTM C 91	M, S, N	Mortero entre las unidades de mampostería*, revoque y estuco
Cementos mortero, ASTM C 1329	M, S, N	Mortero entre las unidades de mampostería*
Cementos plásticos, ASTM C 1328	M, S	Revoque y estuco**
Cementos expansivos, ASTM C 845	E-1(K), E-1(M), E-1(S)	Concreto de contracción (retracción) compensada
Cementos para pozos petroleros, API 10	A, B, C, D, E, F, G, H	Cementación o selladura (sello) de pozos
Cementos repelentes al agua		Mortero para baldosas y azulejos, pintura y revestimiento final de estuco
Cementos de fraguado regulado		Resistencia temprana y reparos***
Cemento con adiciones funcionales, ASTM C 595 (AASHTO M 240), ASTM C 1157		Construcción de concreto en general que necesite de características especiales, tales como reductor de agua, inductor de agua, control de fraguado y propiedades aceleradas
Cemento molido finamente (ultra fino)		Selladura (sello) geotécnica
Cemento de aluminato de calcio		Reparaciones, resistencia química, exposición a altas temperaturas
Cemento de fosfato de magnesio		Reparaciones y resistencia química
Cemento de geopolímero		Construcción general, Reparaciones, estabilización de desechos***
Cemento de etringita		Estabilización de desechos***
Cemento hidráulico de endurecimiento rápido	VH, MR, GC	Pavimentación general donde sea requerido desarrollo rápido de resistencia (aproximadamente 4 horas)

\* Los cementos portland tipos I, II, III y los cementos adicionados tipos IS, IP y I(PM) también se emplean en la producción de morteros.

\*\* Los cementos portland tipos I, II, III y los cementos adicionados tipos IP, I(SM) y I(PM) también se emplean en la producción de revoques.

\*\*\* Los cementos portland y los cementos hidráulicos adicionados se emplean también para estas aplicaciones.

### **2.3.2 Morteros para rehabilitación de estructuras**

Existen en el mercado microhormigones y morteros industrializados ya adecuadamente dosificados para uso en reparos y refuerzos según el tipo de problema patológico que se presente, según las características de la zona a ser reparada, por ejemplo, vertical u horizontal, y resistentes a la agresividad del medio ambiente. Están incluidos en este grupo los hormigones proyectados, tanto vía seca como vía húmeda. Normalmente usan áridos gruesos de tamaño máximo característico igual a 9 mm, lo que en realidad los clasificaría como microhormigones o morteros proyectados.

Los materiales avanzados, formulados a base de resinas y combinaciones de resinas con otros materiales - fibras, *filler*, etc. - se establecieron como respuesta científico-técnica moderna a las exigencias de desempeño y durabilidad en continua evolución en todo el mundo, especialmente en las situaciones en que el hormigón necesita ser modificado o donde su uso es inadecuado.

#### **Morteros poliméricos**

Son morteros a base de cemento Portland modificados con polímeros, que usan áridos con granulometría adecuada - generalmente continua atendiendo a las curvas de Bolomey; o discontinua, en el caso de alta resistencia a la abrasión - formulados especialmente con aditivos y adiciones que les confieren propiedades especiales. Son también llamados de morteros de base mineral y el proceso de endurecimiento está basado en la reacción de los granos de cemento con el agua de amasado.

En general tienen retracción compensada y son tixotrópicos, permitiendo su uso en superficies verticales e inclinadas. Pueden ser formulados con resinas acrílicas del tipo metilmetacrilato o estireno-butadieno, o con resinas a base de PVA. En este último caso tienen aplicaciones limitadas, debido a la baja resistencia ante la humedad y la acción agresiva del ambiente. Algunas veces estos morteros poliméricos de base cemento también son llamados de morteros con látex, debido a la similitud de algunas propiedades de esas resinas con las propiedades del material natural látex, utilizado para la fabricación de gomas.

#### **Grauting de base cemento**

El *graunting* es un material fluido y auto-adensable en estado recién mezclado, destinado a rellenar cavidades y consecuentemente tornarse adherente, resistente y sin retracción en el estado endurecido.

*Mauricio Arreola Sánchez*

Un *grouting* de base cemento está constituido por cemento Portland común u ordinario, cemento compuesto (con adiciones) o cemento de alta resistencia inicial, áridos de granulometría adecuada, aditivos expansores y aditivos superplastificantes. Por sus características de alta fluidez, buena adherencia, baja retracción y alta impermeabilidad, este tipo de *grouting* es conveniente para reparaciones en locales de acceso difícil o en secciones densamente armadas.

### **Morteros y *grouting* orgánicos**

Son morteros y *groutings* formulados con resinas orgánicas donde la unión y la resistencia del conjunto es dada por las reacciones de polimerización y endurecimiento de los componentes de las resinas, en ausencia de agua. El cemento Portland puede entrar en la composición del producto como un árido fino también llamado de *filler*, completando la distribución granulométrica y rellenando los vacíos de la arena, actuando como inerte.

Normalmente resultan morteros y *groutings* con elevada resistencia mecánica y química, apropiadas para ambientes altamente agresivos o en aquellos lugares donde son exigidas altas prestaciones de los reparos, refuerzos y protecciones. En general están formulados para uso en pequeños volúmenes y espesores, pues tienen elevada adherencia al sustrato y bajo módulo de deformación longitudinal, así como deformación lenta superior a la de los hormigones y morteros de cemento Portland. Son también llamados de morteros o revestimientos anticorrosivos.

Los *grouting* de base orgánica pueden ser formulados con resina prácticamente pura, cuando se destinan a rellenar fisuras, siendo conocidos también como *grouting* para inyección de fisuras, teniendo baja viscosidad. Los diferentes tipos de estos morteros son:

- Morteros de base epoxi
- Morteros de base fenólica
- Morteros de base poliéster y de base estervinílica
- Morteros de base furánica



### **Hormigones y morteros de fraguado/endurecimiento rápido**

En innumerables ocasiones es preciso realizar reparos rápidos que permitan por ejemplo la continuidad de la producción en industrias o la liberación del tránsito. Los productos pueden ser morteros elaborados con cemento aluminosos, que presentan fraguado rápido y alta resistencia en las primeras edades. Los cuales tienen el inconveniente que con el tiempo pierden parte de la resistencia alcanzada inicialmente, debido a la transformación morfológica que sufren los cristales de aluminato.

Estos productos pueden ser también formulados con base en la reacción del magnesio con fosfato, que así como el anterior, desarrollan rápidas resistencias iniciales. Materiales de base sulfato de calcio son también empleados para esta finalidad.

### **Morteros de azufre**

Disponibles en forma de polvo, granulados o lingotes. Son compuestos fundidos en caliente a una temperatura de 120 °C y derramados aún calientes. Los morteros a base de azufre están compuestos de azufre, sílica inerte, *filler* de carbono y plastificantes. Los plastificantes reducen la fragilidad, mejoran las propiedades mecánicas e impiden la conversión del azufre a una forma cristalina inapropiada.

Estos morteros son particularmente útiles para la protección contra ácidos oxidantes. Cuando contienen carbono, son adecuados para la protección contra combinaciones de ácidos oxidantes y ácidos fluorhídricos. La resistencia térmica de los morteros de azufre es relativamente baja y su peso por lo tanto limitado a las instalaciones con temperatura de trabajo por debajo de 88 °C. Es baja su resistencia química frente a soluciones alcalinas fuertes y ciertos tipos de solventes orgánicos. Se recomienda su uso para pH entre 1,0 y 14,0. El tiempo de uso (*pot life*) es muy variable.<sup>[22]</sup>

## 2.4 Aditivos

Los aditivos son productos químicos, añadido al hormigón, mortero o lechada de cemento en el momento de la mezcla, para modificar las propiedades, ya sea en estado húmedo, inmediatamente después de la mezcla o después de la mezcla se haya endurecido. Ellos pueden ser una sola sustancia química o una mezcla de varias sustancias químicas y pueden ser suministrados en forma de polvos, pero la mayoría son soluciones acuosas debido a que en esta forma son más fáciles de dispensar con precisión.

La dosificación puede ser expresada como litros o kg por 100 kg de cemento, cemento y normalmente incluye cualquier escoria, PFA o demás aglutinantes añadidos en el mezclador.

Los aditivos presentados en este subcapítulo no son los mismos que los aditivos, que son productos químicos premezclados con el cemento o una mezcla cementosa seca. Tampoco son los mismos que las adiciones, que se añaden a la mezcla. Tipo I adiciones son esencialmente inertes, por ejemplo, polvo de piedra caliza o pigmentos. Adiciones de tipo II son puzolánicas o ligantes hidráulicos latentes como pfa o humo de sílice.<sup>[12]</sup>

### 2.4.1 Tipos y usos

El concreto debe ser trabajable, fácilmente acabado, fuerte, durable, estanco y resistente al desgaste. Estas calidades se las puede obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados, preferiblemente al uso de aditivos (a excepción de los inclusores de aire cuando son necesarios).

Las razones principales para el uso de aditivos son:

- Reducción del costo de la construcción de concreto.
- Obtención de ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras;
- Manutención de la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colado (colocación) y curado.

A pesar de estas consideraciones, se debe observar que ningún aditivo de cualquier tipo o en cualquier cantidad se lo puede considerar como un sustituto de las buenas prácticas de construcción.

Tabla 2-9. Tipos de aditivos y su efecto. [11]

Tipo de Aditivo y Normas	Efecto Deseado	Material
Acelerador	Acortar el tiempo de fraguado y el desarrollo de la resistencia temprana	Cloruro de calcio, (ASTM D 98 and AASHTO M 144) trietanolamina, tiocianato de sodio, formiato de calcio, nitrito de calcio, nitrato de calcio
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo C), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NMX-C-255, NMX-C-356, NTC 1299 (tipo C), NTP 334.088		
Adherencia	Aumentar la resistencia de adherencia	Cloruro polivinilo, acetato polivinilo, acrílicos, copolímeros de butadienoestireno
Aditivo para Lechada	Ajustar las propiedades de la lechada para aplicaciones específicas	Consulte los aditivos inclusores de aire, aceleradores, retardadores y reductores de agua
Agente Espumante	Producir concreto ligero y concreto celular con baja densidad	Surfactantes catiónicos o aniónicos Proteína hidrolizada
Anti-deslave	Aumentar la cohesión del concreto para su colocación bajo agua	Celulosa, polímero acrílico
A Prueba de Humedad	Retrasar la penetración de humedad en el concreto seco	Jabones de estearato de calcio o amonio u oleato Estearato butilo Productos de petróleo
Auxiliar de bombeo	Mejorar las condiciones de bombeo	Polímeros orgánicos y sintéticos Floculantes orgánicos Emulsiones orgánicas de parafina, alquitrán, asfalto, acrílicos Bentonita y sílice pirogénica Cal hidratada (ASTM C 141)
Colorante	Producir concreto coloreado	Negro de humo modificado, óxido férrico, tierra de sombra, óxido de cromo, óxido de titanio y azul cobalto
ASTM C 979, NMX-C 313, NTC 3760		
Control de Hidratación	Suspender y reactivar la hidratación del cemento con un estabilizador y un activador	Ácidos carboxílicos Sales de ácidos orgánicos conteniendo fósforo
Formador de gas	Causar expansión antes del fraguado	Polvo de aluminio
Fungicida, germicida e insecticida	Inhibir o controlar el crecimiento de bacterias y hongos	Fenoles polihalogenados Emulsiones de dieldrin Compuestos de cobre
Impermeabilizantes	Disminuir la permeabilidad	Látex Estearato de calcio
Inclusores (incorporador) de Aire	Mejorar la durabilidad en los ambientes sujetos a congelación-deshielo, sales, sulfatos y ambientes alcali reactivos Mejorar la durabilidad	Sales de resinas de madera (resina vinsol) Algunos detergentes sintéticos Sales de lignina sulfonada Sales de ácidos de petróleo Sales de material protináceo Ácidos grasos y resinosos y sus sales Sulfonatos de alquilbenceno Sales de hidrocarburos sulfonados
ASTM C 260, AASHTO M 154, COVENIN 0357, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NGO 41069, NMX-C-200, NTC 3502, NTP 334.089, NGO 41016		
Inhibidor de reacción alcali-agregado	Reducir la expansión por reactividad alcali-agregado	Sales de bario, nitrato de litio, carbonato de litio, hidróxido de litio
Inhibidor de Corrosión	Reducir la corrosión del acero en ambientes con alta concentración de cloruros	Nitrito de calcio, nitrito de sodio, benzoato de sodio, ciertos fosfatos y fluosilicatos, fluoaluminatos, esteramina
Purgador de aire (reductor de aire)	Disminuir el contenido de aire	Fosfato tributilo, ftalato dibutilo, alcohol octilo, ésteres insolubles en ácidos carbónico y bórico, silicones
Reductor de agua	Reducir en hasta 5% el contenido de agua	Lignosulfonatos Ácido carboxílico hidroxilato Carbohidratos (también tienden a retardar el fraguado, entonces normalmente se añade un acelerador)
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo A), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NMX-C-255, NTC 1299, NTP 334.088		

Continuación de tabla 2-9.

Tipo de Aditivo y Normas	Efecto Deseado	Material
Reductor de agua y acelerador	Reducir en hasta 5% el contenido de agua y acelerar el fraguado	Véase reductor de agua (se añade acelerador)
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo E), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NMX-C-255, NTC 1299, NTP 334.088		
Reductor de agua y retardador	Reducir en hasta 5% el contenido de agua y retardar el fraguado	Véase reductor de agua (se añade retardador)
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo D), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NMX-C-255, NTC 1299, NTP 334.088		
Reductor de agua de alto rango	Reducir en hasta 12% el contenido de agua	Véanse superplastificantes
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo F), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NTC 1299, NTP 334.088,		
Reductor de agua de alto rango y retardador	Reducir en hasta 12% el contenido de agua y retardar el fraguado	Véanse superplastificantes y reductores de agua
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo G), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NTC 1299, NTP 334.088		
Reductor de agua de medio rango	Reducir el contenido de agua de 6% a 12% sin retardo del fraguado	Lignosulfonatos Policarboxilatos
Reductor de contracción	Disminuir la contracción por secado	Éter alkil polioxialkileno Propileno glicol
Retardador	Retardar el tiempo de fraguado	Lignina Bórax Azúcares Ácido tartárico y sales
ASTM C 494, AASHTO M 194 (tipo B), COVENIN 0356, IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NMX-C-255, NTC 1299 (tipo B), NTP 334.088		
Superplastificante	Aumentar la fluidez del concreto Disminuir la relación agua-cemento	Formaldehido condensado de melamina sulfonato Formaldehido condensado de naftaleno sulfónico Lignosulfonatos Policarboxilatos
ASTM C 1017 (tipo 1), IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NTC 4023 (tipo F), NTP 334.088		
Superplastificante y Retardador	Aumentar la fluidez del concreto con tiempo de fraguado retardado Disminuir la relación agua-cemento	Véanse superplastificantes y reductores de agua
ASTM C 1017 (tipo 2), IRAM 1663, NCh2182.Of1995, NTC 4023 (tipo G)		

## 2.5 Características y propiedades de los morteros y concretos

El concreto (hormigón) es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada piedra machacada, pedrejón), creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua. Otros materiales cementantes (cementicios, cementosos) y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta.

Generalmente los agregados (áridos) se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturadas) con partículas de hasta 9.5 mm ( $\frac{3}{8}$  pulg.); agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla 1.18

*Mauricio Arreola Sánchez*

mm (tamiz no.16) y pueden llegar hasta 150 mm (6 pulg.). El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es 19 mm o 25 mm ( $\frac{3}{4}$  pulg. o 1 pulg.). Un agregado de tamaño intermedio, cerca de 9.5 mm ( $\frac{3}{8}$  pulg.) es, algunas veces, adicionado para mejorar la granulometría general del agregado.

La pasta se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado). La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. El volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto. La granulometría continua de tamaños de partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta.

La calidad del concreto depende de la calidad de la pasta y del agregado y de la unión entre los dos. En un concreto adecuadamente confeccionado, cada y toda partícula de agregado es completamente cubierta por la pasta y todos los espacios entre las partículas de agregados se llenan totalmente con pasta. Para cualquier grupo de materiales y condiciones de curado, la calidad del concreto endurecido es fuertemente influenciada por la cantidad de agua usada con relación a la cantidad de cemento, cuanto menos agua se usa, mejor es la calidad del concreto, si es que la mezcla se puede consolidar adecuadamente.

Tanto las propiedades del concreto fresco (plástico) como del concreto endurecido se pueden cambiar con la adición al concreto de aditivos químicos, normalmente en la forma líquida, durante la dosificación.

Después de terminar el proporcionamiento, dosificación, colocación (hormigonado, puesta, colado), consolidación, acabamiento (terminación, acabado) y curado adecuados, el concreto se endurece, se transforma en un material no-combustible, durable, resistente a la abrasión e impermeable lo cual requiere poca o ninguna conservación (mantenimiento).<sup>[11]</sup>

Tanto las propiedades en estado fresco como en estado endurecido del concreto y mortero están determinadas por la calidad y propiedades del cemento que lo conforma.

*Mauricio Arreola Sánchez*

### 2.5.1 propiedades del cemento

En la fabricación del clínker de cemento portland, durante la calcinación, el calcio combina con otros componentes de la mezcla cruda para formar cuatro compuestos principales que corresponden al 90% de la masa del cemento. Durante la molienda, se añaden yeso (4% hasta 6%) u otra fuente de sulfato de calcio y otros auxiliares de molienda.

Se usa el término “fase” preferiblemente al término “compuesto” para describirse los componentes del clínker. Siguen los cuatro compuestos principales en el cemento portland, sus fórmulas químicas aproximadas y abreviaturas:

- Silicato tricálcico  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$
- Silicato dicálcico  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$
- Aluminato tricálcico  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$
- Ferroaluminato Tetracálcico  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$

Siguen las formas de sulfato de calcio, sus fórmulas químicas y abreviaturas:

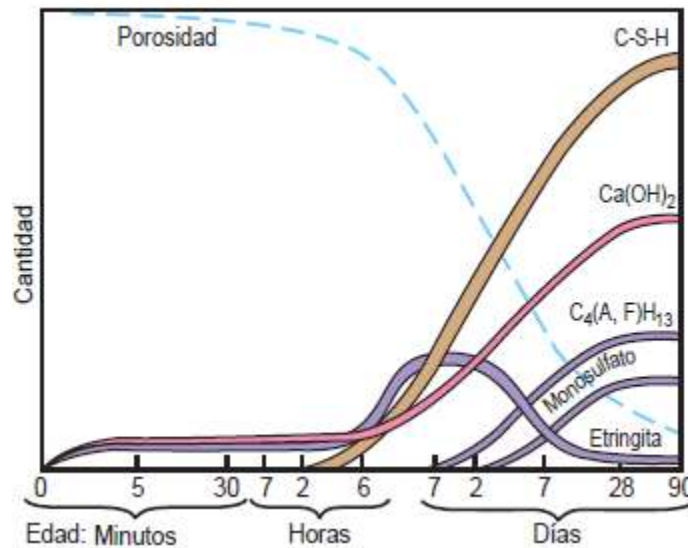
- Sulfato de calcio anhidro (anhidrita) =  $\text{CaSO}_4 = \text{CaO}\cdot\text{SO}_3 = \text{CA}$
- Sulfato de calcio dihidratado (yeso) =  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CA}\cdot\text{H}_2$
- Hemidrato de sulfato de calcio =  $\text{CaSO}_4\cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} = \text{CA}\cdot\text{H}_{1/2}$

El yeso, sulfato de calcio dihidratado, es la fuente de sulfato más empleada en el cemento.

El  $\text{C}_3\text{S}$  y el  $\text{C}_2\text{S}$  en el clínker se conocen como alita y belita, respectivamente. La alita constituye del 50% al 70% del clínker, mientras que la belita es responsable por sólo 15% al 30%. Los compuestos de aluminato constituyen aproximadamente del 5% al 10% del clínker y los compuestos de ferrita del 5% al 15%.

En presencia de agua, estos compuestos se hidratan (se combinan químicamente con el agua) para formar nuevos compuestos, los cuales son la infraestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto (Gráfica 2-3). Los silicatos de calcio,  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ , se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (arcaicamente llamado gel de tobermorita). El cemento portland hidratado contiene del 15% al 25% de hidróxido de calcio y aproximadamente 50% de silicato de calcio hidratado, en masa. La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al silicato de calcio hidratado. El  $\text{C}_3\text{A}$  reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar aluminato tetracálcico hidratado. El  $\text{C}_4\text{AF}$  reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado. El  $\text{C}_3\text{A}$ , sulfato (yeso, anhidrita u otra fuente de

sulfato) y el agua se combinan para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado), monosulfato de calcio y otros compuestos afines.



Gráfica 2-3. Hidratación de los componentes del cemento. <sup>[11]</sup>

El conocimiento actual de la química del cemento indica que los compuestos principales del cemento tienen las siguientes propiedades: <sup>[11]</sup>

**Halita, con alto contenido de C<sub>3</sub>S:** es la fase principal de la mayoría de los clínkers Pórtland, y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica. Reacciona rápidamente con el agua, endurece en corto tiempo y tiene alto calor de hidratación, de tal manera, que afecta el tiempo de fraguado y la resistencia inicial.

**Belita, a base de C<sub>2</sub>S:** es usualmente la segunda fase en importancia del Clínker. Su componente principal (C<sub>2</sub>S) reacciona lentamente con el agua, con un consecuente bajo calor de hidratación y una contribución al desarrollo de la resistencia a partir de siete días. La fase belita y halita, determinan decisivamente el desarrollo de la resistencia y difieren entre sí en su tasa de endurecimiento y de liberación de calor de hidratación. El contenido de estas dos suma aproximadamente de 70 a 80% del cemento. Se supone que de manera aproximada, el C<sub>3</sub>S aporta una resistencia a corto y mediano plazo (contribución al desarrollo de la resistencia durante las primeras 4 semanas) y el C<sub>2</sub>S a mediano y largo plazo.

**Aluminato, rico en C<sub>3</sub>A:** este compuesto no es puro, sino más bien una solución sólida de C<sub>3</sub>A con algo de impurezas de SiO<sub>2</sub> y MgO que reacciona de manera rápida con agua, contribuye con calor alto de hidratación y una alta resistencia inicial. Además, confiere al concreto propiedades indeseables, como cambios volumétricos y poca resistencia a la acción de los sulfatos razón por la cual su contenido se limita entre 5 y 15% según el tipo de cemento. <sup>[17]</sup>

**Ferrito C<sub>4</sub>AF, solución sólida compuesta por ferritos y aluminatos de Calcio:** este componente está presente en pequeñas cantidades en el cemento y en comparación con los otros tres componentes, no influye en forma significativa en su comportamiento, colaborando escasamente a la resistencia del concreto, siendo relativamente inactivo, pero es útil al facilitar la fusión durante el calcinamiento del Clínker. <sup>[30]</sup>

### **Agua no evaporable**

El agua es un ingrediente clave de las pastas, morteros y concretos, pues las fases en el cemento portland tienen que reaccionar químicamente con el agua para desarrollar resistencia. La cantidad de agua adicionada a la mezcla también controla la durabilidad. El espacio en la mezcla inicialmente lleno de agua, con el tiempo, se sustituye parcial o completamente mientras que las reacciones de hidratación ocurren.

El cemento consume la misma cantidad de agua en ambas pastas resultando en un volumen mayor en la pasta con relación agua-cemento mayor. A medida que la relación agua-cemento aumenta, la porosidad capilar aumenta y la resistencia disminuye. Las propiedades de transporte, tales como permeabilidad y difusividad también aumentan, permitiendo que sustancias perjudiciales ataquen el concreto o la armadura (refuerzo) más fácilmente.

El agua en los materiales cementantes se encuentra en muchas formas. Agua libre es el agua de la mezcla que no reaccionó con las fases del cemento. La retenida es el agua químicamente combinada en las fases sólidas o físicamente adherida a las superficies del sólido. No es posible una separación confiable del agua químicamente combinada y del agua físicamente adsorbida. Por lo tanto, Powers (1949) distinguió agua evaporable y agua no-evaporable. El agua no-evaporable es la cantidad de agua retenida por un espécimen después de que se lo ha sujeto a procedimientos de secado para la remoción de toda el agua libre (tradicionalmente a través del calentamiento a 105°C).

El agua evaporable ha sido originalmente considerada como agua libre, pero ahora se reconoce que parte de la adsorbida también puede ser perdida bajo calentamiento a esa

*Mauricio Arreola Sánchez*



temperatura. Toda el agua no-evaporable es agua combinada, pero el opuesto no es verdadero. Para estimarse el grado de hidratación del material hidratado, normalmente se usa el contenido de agua no-evaporable.

## **Propiedades físicas del cemento**

### **Finura de cemento**

El cemento portland consiste en partículas angulares individuales, con una variedad de tamaños resultantes de la pulverización del clínker en el molino. Aproximadamente 95% de las partículas del cemento son menores que 45 micrómetros, con un promedio de partículas de 15 micrómetros. La distribución total del tamaño de las partículas del cemento se llama “finura”. La finura del cemento afecta el calor liberado y la velocidad de hidratación. La mayor finura del cemento (partículas menores) aumenta la velocidad o tasa de hidratación del cemento y, por lo tanto, acelera el desarrollo de la resistencia. Los efectos de la mayor finura sobre la resistencia de las pastas se manifiestan, principalmente, durante los primeros siete días. <sup>[11]</sup>

Puesto que la hidratación se inicia en la superficie de las partículas de cemento, que es el área total de la superficie de cemento que representa el material disponible para la hidratación. Por lo tanto, la velocidad de hidratación depende de la finura de las partículas de cemento, y para un rápido desarrollo de la fuerza es necesaria una alta finura. Sin embargo, el coste de la molienda y el efecto de finura en otras propiedades, por ejemplo, consumo de yeso, trabajabilidad del concreto o mortero fresco y el comportamiento a largo plazo, debe tenerse en cuenta.

La finura es una propiedad fundamental de cemento, y ambos cuerpos normativos BS y ASTM requieren la determinación de la superficie específica. <sup>[23]</sup> La finura normalmente se mide por el ensayo (prueba) de permeabilidad al aire Blaine que mide indirectamente el área superficial de las partículas de cemento por unidad de masa. Cementos con partículas más finas tienen mayor área superficial en metros cuadrados por kilogramo de cemento. <sup>[11]</sup>

### **Consistencia**

La consistencia se refiere a la movilidad relativa de la mezcla fresca de pasta o mortero de cemento o su habilidad de fluir. Durante los ensayos (pruebas) de cemento, se mezclan pastas de consistencia normal, definidas como la penetración de  $10 \pm 1$  mm de la aguja de Vicat <sup>[11,23]</sup> (ASTM C 187, AASHTO T 129, COVENIN 494, IRAM 1612, Nch151, NMX-C-057-

*Mauricio Arreola Sánchez*

1997–ONNCCE, NTC 110, NTE 0157, NTP 334.074, UNIT-NM 43).<sup>[11]</sup> Cuando la profundidad de penetración alcanza un cierto valor, el contenido de agua requerido da la consistencia estándar de entre 26 y 33 (expresado como un porcentaje en masa de cemento seco).<sup>[23]</sup>

Se mezclan los morteros para obtenerse una relación agua/cemento fija o proporcionar una fluidez dentro de un rango prescrito. La fluidez de los morteros se determina en una mesa de fluidez (mesa de caídas, mesa de sacudidas) como se describe en las normas ASTM C 230, ASTM C 1437, AASHTO M 152, COVENIN 0485, Nch 2257/1, NMX-C-144, NTC 111, NTP 334.057. Ambos métodos, el de consistencia normal y el de fluidez, se usan para regular la cantidad de agua en las pastas y morteros, respectivamente, para que se los utilice en ensayos subsecuentes. Ambos permiten la comparación de ingredientes distintos con la misma penetrabilidad o fluidez.<sup>[11]</sup>

### **Tiempo de Fraguado**

Este es el término utilizado para describir el fraguado de la pasta de cemento. Broadly habla, fraguado se refiere a un cambio de un fluido a un estado rígido. El fraguado es causado principalmente por una hidratación selectiva de C3A y C3S y está acompañado por aumento de la temperatura en la pasta de cemento; el fraguado inicial corresponde a un aumento rápido y el fraguado final corresponde al pico de temperatura de hidratación. El fraguado inicial y final deben distinguirse del falso fraguado o fraguado rápido que a veces ocurre con algunos minutos de mezclado con agua.<sup>[23]</sup>

El endurecimiento prematuro es el desarrollo temprano de la rigidez en las características de trabajabilidad o plasticidad de la pasta, mortero o concreto de cemento. Esto incluye ambos fraguados, el falso y el rápido. El falso fraguado se evidencia por la pérdida considerable de plasticidad, inmediatamente después del mezclado, sin ninguna evolución de calor.

El objetivo del ensayo (pruebas) del tiempo de fraguado es la determinación (1) del tiempo que pasa desde el momento de la adición del agua hasta cuando la pasta deja de tener fluidez y de ser plástica (llamado fraguado inicial) y (2) del tiempo requerido para que la pasta adquiera un cierto grado de endurecimiento (llamado fraguado final).

Para determinar si un cemento se fragua de acuerdo con los límites especificados en las especificaciones de cemento, los ensayos se realizan con el uso del aparato de Vicat o la aguja de Gillmore.<sup>[11]</sup>

El ensayo de Vicat gobierna si no se especifica ningún ensayo por parte del comprador. Los tiempos de fraguado indican si la pasta está o no sufriendo reacciones normales de hidratación. El sulfato (del yeso u otras fuentes) en el cemento regula el tiempo del fraguado, pero este tiempo también se afecta por la finura, relación agua-cemento y cualquier aditivo empleado. El tiempo de fraguado del concreto no tiene correlación directa con el de las pastas debido a la pérdida de agua para el aire o substrato (lecho), presencia de agregado y diferencias de temperatura en la obra (en contraste con las temperaturas controladas en el laboratorio).

### **Resistencia a Compresión**

Los ensayos de resistencia no se hacen en la pasta de cemento pura debido a las dificultades en la obtención de buenos ejemplares y a la gran variabilidad como consecuencia de los resultados de las pruebas. El mortero de cemento y arena, y en algunos casos, el hormigón de proporciones prescritas, hecha con materiales especificados en condiciones estrictamente controladas, se utilizan para el propósito de determinar la fuerza de cemento.

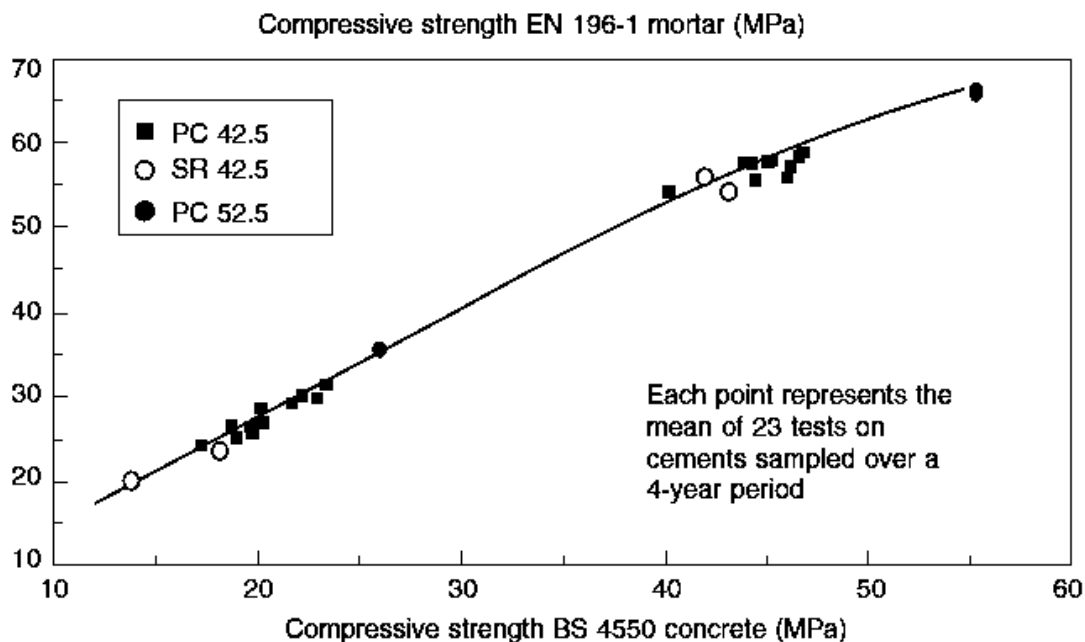
Hay varias formas de pruebas de fuerza: tensión directa, compresión y flexión. En los últimos años, el ensayo de tracción se ha sustituido gradualmente por la prueba de compresión.<sup>[23]</sup>

La resistencia a compresión es aquella obtenida por la prueba (ensayo), por ejemplo, de cubos o cilindros de mortero según la norma ASTM C 109. Se debe preparar y curar los especímenes de acuerdo con la prescripción de la norma y con el uso de arena estándar.

El tipo de cemento, o más precisamente, la composición de los compuestos y la finura del cemento influyen fuertemente la resistencia a compresión. Algunas normas como, por ejemplo, la ASTM C 1157, la IRAM 50000, la MNX-C-414-ONNCCE y la NTP 334.082, traen los requisitos de ambas resistencias, la mínima y la máxima, mientras que la ASTM C 150 y la ASTM C 595 (AASHTO M 85 y M 240), presentan solamente los requisitos de resistencia mínima. Los requisitos de resistencia mínima de las especificaciones de cemento se cumplen por la mayoría de los fabricantes de cemento. Pero, no se debe asumir que dos tipos de cemento que tengan los mismos requisitos de resistencia van a producir morteros o concretos con la misma resistencia, sin que se hagan modificaciones de las proporciones de la mezcla.

Weaver, Isabelle y Williamson (1970) y Dehayes (1990) mencionan que en general, la resistencia del cemento (basada en ensayos en cubos de mortero) no se la puede usar para el pronóstico de la resistencia del concreto con un alto grado de precisión, debido a las muchas variables en las características de los agregados, mezclado del concreto, procedimientos de construcción y condiciones del medioambiente en la obra.<sup>[11]</sup> Mientras que Moir (1999) estudio la relación entre la norma BS 4550 para ensayos de hormigón con la prueba del mortero EN 196-1; Una gran cantidad de datos que se han generado sobre la relación entre el mortero y las fortalezas de hormigón.

Aunque existe una clara relación “normal”, también está claro que diferentes cementos aportan pequeñas diferencias en las relaciones de mortero/hormigón (m/c) y que está en función de la finura del cemento y su química. Esto no es sorprendente, ya que diferentes cementos responden de manera diferente a los cambios en el contenido de cemento y w/c. Este fenómeno se ilustra en la Gráfica 2-4.



Grafica 2-4. Relación entre resistencia de morteros (EN 196-1) y concretos (BS 4550).

Se puede observar que la clasificación resistencia a los 28 días de los cementos era diferente en los tres diferentes contenidos de cemento (y las consiguientes relaciones A / C). Por lo tanto hay un procedimiento de prueba única, ya sea mortero u hormigón, se puede predecir con fiabilidad el rendimiento de cemento a través de una gama de contenidos de cemento.<sup>[12]</sup>

Mauricio Arreola Sánchez

### **Densidad y densidad relativa**

La masa específica del cemento (peso específico, densidad) se define como el peso de cemento por unidad de volumen de los sólidos o partículas, excluyéndose el aire entre las partículas. La masa específica se presenta en megagramos por metro cúbico o gramos por centímetro cúbico (el valor numérico es el mismo en las dos unidades). La masa específica del cemento varía de 3.10 hasta 3.25, con promedio de 3.15 Mg/m<sup>3</sup>. El cemento portland de alto horno y el portland puzolánico tienen masas específicas que varían de 2.90 hasta 3.15, con promedio de 3.05 Mg/m<sup>3</sup>. La masa específica del cemento no es una indicación de la calidad del cemento, su principal uso es en los cálculos de las proporciones de la mezcla.

Para el proporcionamiento de la mezcla, puede ser más útil expresar la masa específica como masa específica relativa, también llamada de gravedad específica, densidad relativa o densidad absoluta. La densidad relativa es un número adimensional determinado por la división de la masa específica del cemento por la densidad del agua a 4°C, la cual es 1.0 Mg/m<sup>3</sup> (1.0 g/cm<sup>3</sup>, 1000 kg/m<sup>3</sup> o 62.4 lb/pies<sup>3</sup>).<sup>[11]</sup>

### **2.5.2 características de morteros y concretos en estado fresco**

Dado que las propiedades a largo plazo de hormigón endurecido: fuerza, volumen, estabilidad y durabilidad han sido gravemente afectadas por su grado de compactación, es vital que la consistencia y trabajabilidad del hormigón fresco sean tales que el hormigón pueda ser adecuadamente compactado y también que pueda ser transportado, colocado y terminado de forma suficientemente fácil sin segregación, lo que sería perjudicial para tales compactación.<sup>[23]</sup> En seguida se presentaran las características que se debe cumplir.

#### **Trabajabilidad**

La facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto y mortero fresco y el grado que resiste a la segregación se llama trabajabilidad. El concreto debe ser trabajable pero los ingredientes no deben separarse durante el transporte y el manejo. El grado de la trabajabilidad que se requiere para una buena colocación del concreto se controla por los métodos de colocación, tipo de consolidación y tipo de concreto. Los diferentes tipos de colocación requieren diferentes niveles de trabajabilidad.

Los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto y mortero son: El método y la duración del transporte; la cantidad y características de los materiales cementantes; la

*Mauricio Arreola Sánchez*

consistencia del concreto (asentamiento en cono de Abrams o revenimiento) % de trabajabilidad en meza de fluidez para morteros; tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos; aire incluido (aire incorporado); cantidad de agua; temperatura del concreto y del aire y aditivos. La distribución uniforme de las partículas de agregado y la presencia de aire incorporado ayudan considerablemente en el control de la segregación y en la mejoría de la trabajabilidad.

Las propiedades relacionadas con la trabajabilidad incluyen consistencia, segregación, movilidad, bombeabilidad, sangrado (exudación) y facilidad de acabado. La consistencia es considerada una buena indicación de trabajabilidad. <sup>[11]</sup>

### **Cohesión y segregación**

Al considerar la trabajabilidad del hormigón, se señaló que el hormigón no se debe segregar, es decir, que debe ser cohesivo, la ausencia de segregación es esencial para que una compactación completa se pueda lograr. La segregación puede definirse como la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea de manera que su distribución no es uniforme. En el caso del hormigón, son las diferencias en el tamaño de las partículas (y algunas veces en la gravedad específica de los constituyentes de la mezcla) la causa primaria de la segregación, pero su extensión se puede controlar por la elección de la clasificación adecuada y por la atención en el manejo.

Hay dos formas de segregación. En la primera, las partículas más gruesas tienden a separarse ya que viajan más lejos a lo largo de una pendiente o se asientan más que las partículas más finas. La segunda forma de segregación, se producen particularmente en las mezclas húmedas, se manifiesta por la separación de la lechada de cemento (cemento más agua) de la mezcla. Con algunas graduaciones, cuando se utiliza una mezcla magra, el primer tipo de segregación se produce si la mezcla es demasiado seca; la adición de agua podría mejorar la cohesión de la mezcla, pero cuando la mezcla se vuelve demasiado húmeda el segundo tipo de segregación tomaría lugar. <sup>[23]</sup>

### **Sangrado y Asentamiento**

Sangrado (exudación) es el desarrollo de una lámina de agua en el tope o en la superficie del concreto recién colocado. Es causada por la sedimentación (asentamiento) de las partículas sólidas (cemento y agregados) y simultáneamente la subida del agua hacia la superficie. El sangrado es normal y no debería disminuir la calidad del concreto adecuadamente colocado, acabado y curado. Un poco de sangrado es útil en el control de

la fisuración por contracción (retracción) plástica. Por otro lado, si es excesiva aumenta la relación agua-cemento cerca de la superficie; puede ocurrir una capa superficial débil y con poca durabilidad.

Después que toda el agua de sangrado (exudación) se evapore, la superficie endurecida va a quedar un poco más baja que la superficie recién colocada. Esta disminución de la altura desde el momento de la colocación (puesta, colado) hasta el inicio del fraguado se llama contracción (retracción) por sedimentación. <sup>[11]</sup> El sangrado también puede ser expresado cuantitativamente como la cancelación total (reducción de la altura) por altura de la unidad de hormigón, y la capacidad de sangrado, así como la tasa de sangrado se puede determinar experimentalmente mediante la prueba de la norma ASTM C 232-04.

Aunque depende del contenido de agua de la mezcla, la tendencia al sangrado depende en gran medida de las propiedades del cemento. El sangrado es inferior con cementos más finos y también se ve afectada por ciertos factores químicos: hay menos sangrado cuando el cemento tiene un alto contenido de álcali, un alto contenido de C3A, o cuando se añade cloruro de calcio, aunque los dos últimos factores pueden tener otros efectos indeseables. Una temperatura más alta, dentro del rango normal, aumenta la tasa de sangrado, pero la capacidad de sangrado total es probablemente no afectada. <sup>[23]</sup>

La tasa de sangrado (exudación) y la capacidad de sangrado (sedimentación total por unidad de peso del concreto original) aumentan con la cantidad inicial de agua, altura del elemento de concreto y presión. El uso de agregados de granulometría adecuada, ciertos aditivos químicos, aire incluido, materiales cementantes suplementarios y cementos más finos reducen el sangrado. <sup>[11]</sup>

### **2.5.3 características de morteros y concretos en estado endurecido**

#### **Curado**

El aumento de la resistencia con la edad continúa desde que el cemento no hidratado aún esté presente, el concreto permanezca húmedo o la humedad relativa del aire esté arriba de aproximadamente 80%, la temperatura del concreto permanezca favorable y haya suficiente espacio para la formación de los productos de hidratación. Cuando la humedad relativa dentro del concreto baja hasta cerca de 80% o la temperatura del concreto baja para menos del cero, la hidratación y la ganancia de resistencia se interrumpen.

Si se vuelve a saturar el concreto después del periodo de secado (deseccación), la hidratación empieza nuevamente y la resistencia vuelve a aumentar. Sin embargo, es mucho mejor que el curado húmedo sea aplicado continuamente desde el momento de la colocación hasta que el concreto haya alcanzado la calidad deseada; una vez que el concreto se haya secado completamente, es muy difícil volver a saturarlo. La exposición al aire libre normalmente proporciona humedad a través del contacto con el suelo y la lluvia.

### **Resistencia**

La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Normalmente, se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados ( $\text{kg/cm}^2$ ), megapascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas ( $\text{lb/pulg}^2$  o psi) a una edad de 28 días. Un megapascal equivale a la fuerza de un newton por milímetro cuadrado ( $\text{N/mm}^2$ ) o 10.2 kilogramos-fuerza por centímetro cuadrado.

Se pueden usar otras edades para las pruebas, pero es importante saber la relación entre la resistencia a los 28 días y la resistencia en otras edades. La resistencia a compresión especificada se designa con el símbolo " $f'_c$ " y la resistencia a compresión real del concreto " $f_c$ " debe excederla.

La determinación de la resistencia a compresión se obtiene a través de ensayos en probetas (especímenes) de concreto o mortero. A menos que sea especificado de manera diferente, los ensayos en mortero se hacen en cubos de 50 mm, mientras que los ensayos en concreto se realizan en cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Cilindros menores 100 x 200 mm también se pueden usar para el concreto.

La resistencia a compresión es una propiedad principalmente física y frecuentemente usada en los cálculos para diseño de puentes, edificios y otras estructuras. La resistencia a flexión o el módulo de ruptura (rotura), se usa en el diseño de pavimentos u otras losas (pisos, placas) sobre el terreno. La resistencia a compresión, la cual es más fácil de medir que la resistencia a flexión, se puede usar como un índice de resistencia a flexión, una vez que la relación empírica entre ambas ha sido establecida para los materiales y los tamaños de los elementos involucrados. La resistencia a flexión de concretos de peso normal es normalmente de 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en megapascales.

La resistencia a la tensión (resistencia a tracción, resistencia en tracción) directa del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de la resistencia a compresión y se estima

*Mauricio Arreola Sánchez*



normalmente como de 0.4 a 0.7 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en megapascuales. La resistencia a esfuerzos por cortante (cisallamiento, corte o cizalladura) es del 8% al 14% de la resistencia a compresión. La resistencia a torsión en el concreto está relacionada con el módulo de ruptura y las dimensiones de los miembros de concreto.

La correlación entre resistencia a compresión y resistencia a flexión, tensión, torsión y cortante varía con los componentes del concreto y el medio ambiente.

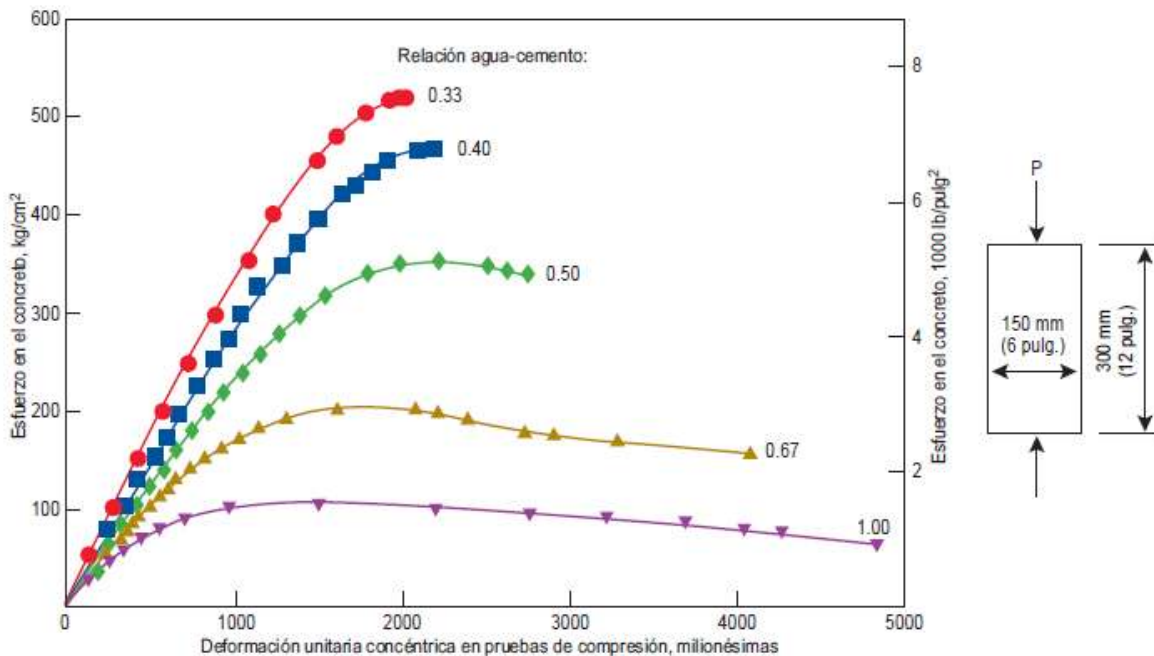
El módulo de elasticidad, denotado por el símbolo E, se puede definir como la razón entre el esfuerzo normal a una deformación correspondiente para el esfuerzo de tensión o compresión abajo del límite de proporcionalidad del material. En concretos de peso normal, el E varía de 140,000 a 420,000 kg/cm<sup>2</sup> o de 14,000 a 41,000 MPa. Como en otras relaciones de resistencia, la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión es específica para una mezcla de ingredientes y se la debe verificar en el laboratorio.<sup>[11]</sup>

### **Factores que influyen en la resistencia del concreto y mortero**

Aunque la porosidad es un factor principal que determina la resistencia, es una propiedad difícil de medir en la práctica de ingeniería, o incluso para calcular ya que el grado de hidratación no se determina fácilmente (suponiendo, por supuesto, que se conoce la relación agua/cemento). Del mismo modo, la influencia de agregado en microfisuración no se cuantifica fácilmente.

Por estas razones, los principales factores que influyen sobre la resistencia se toman en la práctica como: relación agua/cemento, grado de compactación, la edad, y la temperatura. Sin embargo, también hay otros factores que afectan a la resistencia: relación agregado/cemento, la calidad del agregado (clasificación, textura de la superficie, forma, resistencia, y rigidez), el tamaño máximo del agregado y la zona de transición. Estos factores son a menudo considerados como de importancia secundaria cuando se utilizan habitualmente agregados hasta un tamaño máximo de 40mm.<sup>[23]</sup>

En la gráfica siguiente se puede observar se comporta la resistencia en función de la relación agua/cementante.



Gráfica 2-5. Curva esfuerzo-deformación unitaria para concretos a 28 días, con diferente a/c.

### Porosidad

La pasta de cemento fresco es una red plástica de las partículas de cemento en el agua, pero, una vez que se ha fijado la pasta, su volumen aparente o bruto permanece aproximadamente constante. La pasta consiste en sí los hidratos de los diversos compuestos de cemento y de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y el volumen total disponible para todos estos productos de hidratación se compone de la suma del volumen absoluto del cemento seco y del volumen de agua de la mezcla (suponiendo que no hay pérdida de agua debido a un sangrado o evaporación). En consecuencia de la hidratación, el agua de la mezcla toma una de tres formas: agua combinada, gel de agua y el agua capilar.

El cemento hidratado, o gel de cemento, se compone de los productos sólidos de hidratación más el agua que se mantiene físicamente o se adsorbe en la gran área de superficie de los hidratos; esta agua se denomina agua del gel, y se encuentra entre los productos sólidos de hidratación en los llamados "poros del gel". Estos son muy pequeños

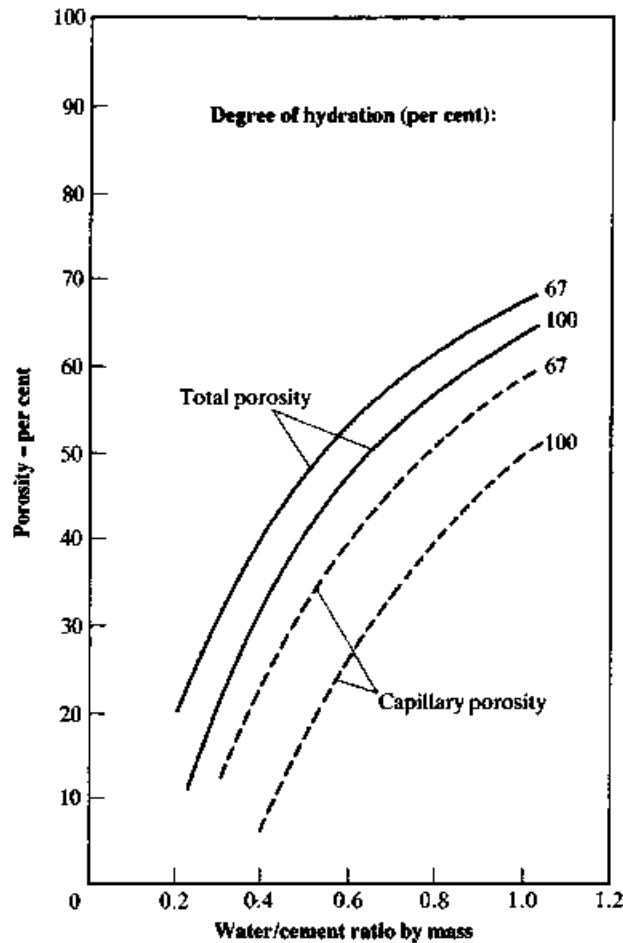
(alrededor de 2nm de diámetro). Se ha establecido que el volumen de agua del gel es 28 por ciento del volumen de gel de cemento.

Además del agua del gel, existe agua que se combina químicamente o físicamente con los productos de la hidratación, y por lo tanto se mantiene muy firmemente. La cantidad de agua combinada se puede determinar como el contenido de "agua no evaporable", y en el cemento completamente hidratado representa alrededor del 23 por ciento de la masa de cemento seco.

Ahora, los productos sólidos de hidratación ocupan un volumen que es menor que la suma de los volúmenes absolutos del cemento seco original (que tiene hidratado) y del agua combinada; por lo tanto, hay un espacio residual dentro del volumen total de la pasta. Para el cemento completamente hidratado sin exceso de agua por encima del requerido para la hidratación, este espacio residual representa aproximadamente el 18,5 por ciento del volumen original de cemento seco. El espacio residual toma la forma de "huecos o poros capilares", que pueden estar vacíos o llenos de agua, dependiendo de la cantidad de agua de la mezcla original y dependiendo también de si la entrada de agua adicional ingresada durante la hidratación. Los poros capilares son mucho más grandes que los poros de gel (diámetro de aproximadamente 1 mm).

Si la mezcla contiene más agua que la necesaria para la hidratación completa, habrá presentes poros capilares en exceso del volumen de 18.5 por ciento mencionó anteriormente, los cuales están llenos de agua.

La porosidad depende de la relación agua/cemento y del grado de hidratación. De hecho, el término w/c es el factor que influye en la porosidad, como se puede ver en la Grafica 2-6, se ilustra también que la disminución de la porosidad es tal que, para la gama habitual de relaciones agua/cemento, la pasta de cemento es de sólo "mitad sólido". Por ejemplo, en una relación agua/cemento de 0,6, el volumen total de poros es de entre 47 y 60 por ciento del volumen total de la pasta de cemento, dependiendo del grado de hidratación.



Grafica 2-6. Relación entre porosidad total, a/c y grado de hidratación de pastas de cemento.

## 2.6 Puzolanas

Considerando la urgencia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, es evidente la necesidad de desarrollar materiales cementosos alternativos, que reduzcan el impacto medio ambiental de las actividades de construcción con cemento portland. Entre las diversas rutas posibles, está el desarrollo de cementos compósitos <sup>[32]</sup>, con la sustitución parcial del cemento por aditivos minerales como escorias metalúrgicas, ceniza volante, metacaolín, etc. Este tipo de cementos son considerados ya por las normas o estándares en diversos países (Norma NMX-C-114, 2003); sin embargo, hay muchos aspectos que requieren investigación para incrementar las posibilidades de utilización de dichos cementos. <sup>[33]</sup>

Durante el proceso de manufacturación (seco o húmedo) del cemento, la industria cementera incorpora materiales suplementarios y/o alternativos de origen: industrial,

*Mauricio Arreola Sánchez*

agrícola, natural o materia prima calcinada para la manufacturación del cemento Pórtland denominándolas “puzolanas” por el alto contenido silico-aluminoso que reaccionan químicamente con la portlandita  $\text{Ca(OH)}$ .<sup>[31]</sup>

La Puzolana es el nombre que recibe la ceniza volcánica, que provenía de la población de Puzzuoli, en las faldas del Vesubio, Italia, donde ya era explotada en tiempos de los romanos. Posteriormente el término fue extendiéndose a todos aquellos materiales que por sus propiedades similares a la Puzolana de origen natural podían tener usos sustitutivos.

Las puzolanas son materiales silíceos o alumino-silíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigüedad Romana hasta la invención del cemento Pórtland en el siglo XIX.<sup>[47]</sup>

El código ASTM (1992), en la definición 618-93 específica a las puzolanas como «materiales silíceos o alumino-silíceos quienes por si solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes».

Con la intención de proveer durabilidad al concreto y mortero reforzado, ya sea mejorando sus propiedades mecánicas, estructurales, físicas o químicas, en diversas investigaciones se ha realizado sustitución del cemento por algunos tipos de cenizas, de las cuales destacan: cenizas volantes, cenizas de alto horno, cenizas de bagazo de caña, CCA, entre otras.<sup>[1-2, 34-46]</sup>

### **2.6.1 reacción de la puzolana**

Como ya se explicó previamente, la puzolana es un material que contiene sílice natural o artificial en una forma reactiva. Por sí mismas, las puzolanas tienen poco o ningún valor cementante. Sin embargo, en una forma finamente dividida y en presencia de humedad van a reaccionar químicamente con los álcalis, generados por la hidratación del cemento portland, para formar compuestos de cementación.

En la imagen 2-5, se muestra las dos reacciones químicas necesarias para que los materiales puzolánicos formen los mismos compuestos cementantes que en la hidratación del cemento portland.

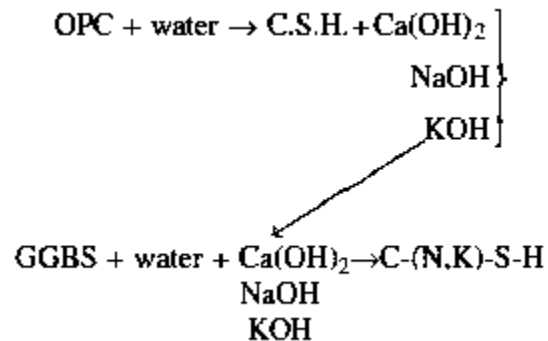


Imagen 2-5. Reacción puzolánica de la escoria.<sup>[12]</sup>

Las puzolanas deben estar finamente molidas con el fin de exponer un área de superficie grande para las soluciones alcalinas para que la reacción proceda. La sílice en una puzolana tiene que ser amorfa, o vítreo, para que sea reactivo.<sup>[12]</sup>

### 2.6.2 Clasificación de las puzolanas

Como se puede leer en los párrafos anteriores, las puzolanas se pueden clasificar según su origen en, puzolanas naturales y puzolanas artificiales (cenizas); estas últimas pueden ser subproductos de algún proceso industrial o agroindustrial.

La norma ASTM C-618 da una clasificación para estos dos grupos de puzolanas, dicha clasificación toma en cuenta varios factores. Tales como, origen y composición química; las cuales se muestran en seguida:

*Definición de ceniza volante:*

La ceniza volante es el residuo finamente dividido que resulta de la combustión de la planta o el carbón en polvo y que es transportado por los gases de combustión.

NOTA: Esta definición de las cenizas volantes no incluye, entre otras cosas, el residuo resultante a partir de: La quema de basura municipal o cualquier otro tipo de basura con el carbón; la inyección de cal directamente en la caldera para la eliminación de azufre; o la quema de basura industrial o municipal en incineradores comúnmente conocidas como cenizas de incineración.

*Clasificación*

**Clase N:** Puzolanas naturales en bruto o calcinada, que cumplen con los requisitos aplicables para la clase como dados en este documento, como algunas tierras de

*Mauricio Arreola Sánchez*

diatomeas; cherts opalina y lutitas, tobas y cenizas volcánicas o pumicites calcinadas o sin calcinar, y diversos materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y lutitas.

**Clase F:** Cenizas volantes que normalmente se producen por la quema de la antracita o carbón bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables de esta clasificación. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.

**Clase C:** Cenizas volantes que normalmente se produce a partir del lignito y carbón sub-bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables a esta clasificación. Esta clase de las cenizas volantes, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes.

*Composición química*

Las cenizas volantes y puzolanas naturales deben cumplir con los requisitos sobre la composición química prescrito en la Tabla. <sup>[48]</sup>

Tabla 2-10. Requisitos químicos de puzolanas. <sup>[48]</sup>

Requerimientos Químicos			
Compuesto	Tipo de Puzolana		
	N	F	C
SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %min	70	70	50
SO <sub>3</sub> %max	4	5	5
Contenido de Humedad %max	3	3	3
PPI %max	10	6*	6

\*Se usa la clasificación "F" para puzolanas con un contenido de PPI mayor a 12%.

**2.6.3 Tipos y usos de puzolanas**

Newman (2003) <sup>[12]</sup> y Kosmatka (2004) <sup>[11]</sup> describen las aportaciones de los principales materiales puzolánicos se usan de forma común en la fabricación de concreto y mortero, dichos materiales son: Ceniza volante, Escoria granulada de alto horno, Humo de sílice y puzolanas naturales (dentro de estas se las más usadas son el Metacaolín y la piedra caliza).

Aunque al día de hoy existen otros materiales que también han sido muy estudiados, tales como la ceniza de bagazo de caña y la ceniza de cascarilla de arroz <sup>[1,2,16]</sup>; estos materiales podrían calcificarse dentro de las puzolanas artificiales de origen agrícola o agroindustrial.

### **Ceniza volante**

La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad y es el material cementante suplementario más utilizado en los Estados Unidos. Bajo la ignición (combustión) en el horno, la mayor parte de la materia volátil y el carbono del carbón se queman. Durante la combustión, las impurezas minerales del carbón (tales como arcilla, feldespato, cuarzo y esquisto) se funden en suspensión y se transportan hacia afuera de la cámara por los gases de escape. En el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica como pequeñas esferas vítreas llamadas cenizas volantes. Luego, se colecta la ceniza volante de los gases de escape a través de precipitadores electrostáticos o de filtros de manga. La mayoría de las partículas de ceniza volante son esferas y algunas son cenosferas huecas. También se pueden presentar en la forma de plerosferas, que son esferas que contienen esferas menores.

Los materiales molidos, como el cemento portland, tienen partículas sólidas angulares. Los tamaños de las partículas de la ceniza volante varían de menos de 1  $\mu\text{m}$  (micrómetro) hasta más de 100  $\mu\text{m}$ , siendo que el tamaño de una partícula típica es de 20  $\mu\text{m}$ . Sólo el 10% al 30% de la masa de las partículas es mayor que 45  $\mu\text{m}$ . El área superficial es normalmente de 300 a 500  $\text{m}^2/\text{kg}$ , a pesar de que algunas cenizas pueden tener área superficial tan baja como 200  $\text{m}^2/\text{kg}$  o tan alta como 700  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

La ceniza volante es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Los constituyentes menores son magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono. Los compuestos cristalinos están presentes en pequeñas cantidades. La masa específica relativa de la ceniza volante normalmente varía de 1.9 a 2.8 y el color es generalmente gris o marrón.

Las cenizas volantes Clase F y Clase C de la ASTM C 618 (AASHTO M 295) se emplean comúnmente como aditivos (adiciones) puzolánicos en concretos de uso universal. Los materiales de Clase F son normalmente cenizas volantes con bajo contenido de calcio (menos del 10% de CaO) y contenido de carbono menor que 5%, pero algunas pueden contener hasta 10%. Los materiales de la Clase C normalmente presentan alto contenido de calcio (del 10% al 30% de CaO) y contenido de carbono menor que 2%. Muchas de las cenizas volantes de la Clase C cuando se exponen al agua, se hidratan y se endurecen en menos de 45 minutos. Algunas cenizas volantes se encuadran en ambas Clases F y C. <sup>[11]</sup>



### Escoria granulada de alto horno

Escoria de alto horno es un subproducto de la producción de arrabio, una etapa en la producción de acero, aproximadamente 300 kg de escoria se generan por cada tonelada de arrabio <sup>[49]</sup>. Se produjeron en todo el mundo más de 167 millones de toneladas de escoria en 1996 <sup>[50]</sup>. Se estima que alrededor de 1,4 millones son producidos anualmente por los dos mayores empresas siderúrgicas. <sup>[51]</sup>

Este producto se desarrolla en el estado fundido simultáneamente con el acero en un alto horno. La escoria fundida a la temperatura de cerca de 1500°C se enfría rápidamente y se apaga en el agua para formar un material granulado vítreo. El material granulado, el cual es molido hasta menos de 45 µm, tiene un área superficial Blaine de 400 a 600 m<sup>2</sup>/kg. La masa específica relativa para la escoria granulada de alto horno molida es de 2.85 a 2.95 y la masa unitaria varía de 1050 a 1375 kg/m<sup>3</sup>.

La composición química de la escoria varía ampliamente entre plantas debido a las diferencias en las materias primas empleadas <sup>[50]</sup>, se han propuesto diversos índices, para intentar predecir la calidad de las escorias aceptables, un ejemplo es el índice  $I_h = (C + 1,4 M + 0,56 A) / S > 1,65$  <sup>[52]</sup>

La escoria granulada es áspera y tiene forma angular. En presencia del agua y de un activador, NaOH o CaOH, ambos suministrados por el cemento portland, la escoria se hidrata y se endurece de una manera similar al cemento portland. Sin embargo, las escorias enfriadas por el aire no presentan las propiedades hidráulicas de las escorias enfriadas por el agua. <sup>[11]</sup>

BFS se pueden utilizar para reemplazar parcialmente OPC, o como un material cementoso en sí después de la activación química. Muchas investigaciones se han desarrollado en las dos áreas, sin embargo, los estudios comparativos de ambas vías en uno BFS no son comunes. Varios factores influyen en la reactividad de BFS, entre ellos están: la superficie, la composición química, la fracción vítrea, etc.

Los concretos basados en escoria activada son de menor impacto ambiental, ya que la escoria no requiere tratamiento térmico y no hay descarbonatación de CaCO<sub>3</sub> como en el cemento Portland. La escoria es más resistente a la molienda que el cemento Portland, un tamaño de partícula más grueso contribuye a reducir los costos también. <sup>[53]</sup>

La escoria granulada de alto horno fue desarrollada en Alemania en 1853 (Malhotra 1996) y se ha usado desde el inicio del siglo XX (Abrams 1925). La escoria granulada de alto

*Mauricio Arreola Sánchez*

horno molida, cuando es empleada en los concretos para uso general en los Estados Unidos, normalmente constituye del 30% al 45% de la masa del material cementante en la mezcla (Fig. 3-4) (PCA 2000), pero algunos concretos de escoria tienen 70% o más de escoria. La ASTM C 989 (AASHTO M 302) clasifica la escoria por su nivel creciente de reactividad como grado 80, 100 o 120 (tabla 3-1). La ASTM C 1073 presenta un método para la determinación de la actividad hidráulica de la escoria granulada de alto horno molida y el ACI 233 (1995) presenta una amplia discusión sobre las escorias. <sup>[11]</sup>

### **Humo de sílice**

El humo de sílice, también llamado de microsílíce, humo desílíce condensado o sílice activa, es un subproducto que se usa como una puzolana. Este subproducto es el resultado de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferrosilicio. El humo de sílice sube como un vapor oxidado de los hornos a 2000°C. Cuando se enfría, el humo se condensa y se colecta en bolsas de tela enormes. El humo de sílice condensado se procesa para removerle las impurezas y para controlar el tamaño de las partículas.

El humo de sílice condensado es básicamente dióxido de silicio (normalmente más del 85%) en una forma no cristalina (amorfa). Por ser un material transportado por el aire, tal como la ceniza volante, presenta una forma esférica. Se trata de un material extremadamente fino, con partículas con menos de 1 mm de diámetro y con diámetro promedio de cerca de 0.1  $\mu\text{m}$ , aproximadamente cien veces menor que el promedio de las partículas de cemento.

El área superficial del humo de sílice condensado es aproximadamente 20,000  $\text{m}^2/\text{kg}$  (método de la adsorción de nitrógeno). Los cementos ASTM tipos I y III tienen un área superficial de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  a 400  $\text{m}^2/\text{kg}$  y de 500 a 600  $\text{m}^2/\text{kg}$ , respectivamente. La masa específica relativa del humo de sílice es generalmente de 2.20 a 2.5, mientras que la masa específica relativa del cemento portland es cerca de 3.15. La masa unitaria del humo de sílice varía de 130 a 430  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

El humo de sílice se usa en cantidades que varían del 5% al 10% de la masa total de material cementante. Se emplea donde sea necesario un alto grado de impermeabilidad y alta resistencia del concreto. <sup>[11]</sup>

### **Puzolanas naturales**

Puzolanas naturales son materiales vítreos amorfos, que normalmente se clasifican en cuatro grupos:

1 materiales volcánicos - estos son ricos en vidrio en estado natural o parcialmente alterada. Se encuentran en todo el mundo en las regiones volcánicas. Son el resultado de la explosión de magma que se enfrió rápidamente por ser inactivada para formar vidrio microporoso. A menudo, estos materiales se componen de > 50 por ciento de sílice, seguido de alúmina, óxidos de hierro y cal. A menudo tienen un alto contenido de álcali de hasta 10 por ciento.

2 tobas - donde un vidrio volcánico se ha transformado en parte o totalmente en compuestos zeolíticos debido a la intemperie. La gama de la composición química es similar a los materiales volcánicos. La pérdida por ignición es una indicación del grado de transformación que se ha producido debido a la intemperie.

3 sedimentaria - estos son ricos en diatomeas opalina. Las diatomeas son los esqueletos de los organismos que se componen principalmente de ópalo. Ellos tienen alto contenido de sílice, sin embargo, estos materiales son a menudo contaminados con arcilla.

4 diagenética - Estos son ricos en sílice amorfa y derivados de la erosión de las rocas silíceas. Ellos son normalmente altos en sílice y bajos en otros óxidos, dependiendo de la composición mineral de la roca madre.

Con todos los materiales puzolánicos, la forma y la gradación de partículas tendrá un efecto significativo en la necesidad de agua del hormigón. Puzolanas origen natural suelen tener forma irregular, que aumentará la demanda de agua a menos que se utilizan plastificantes para compensar.<sup>[12]</sup>

Otro grupo de materiales puzolánicos naturales, que son los más comúnmente empleados hoy en día, son los materiales procesados, los cuales se tratan por altas temperaturas en los hornos y después se muelen hasta que se transformen en un polvo fino. Estos materiales incluyen arcillas calcinadas, esquisto calcinado y metacaolinita.<sup>[11]</sup>

Los materiales arcillosos con un alto porcentaje de cuarzo y feldespatos, minerales que son altamente cristalinos y no reactivos a la cal. Son materiales que al ser empleados como puzolanas reaccionan pobremente en estado natural e incrementa su reactividad cuando es inducida una activación térmica debido a la modificación de la estructura

*Mauricio Arreola Sánchez*

cristalina además dichos materiales interaccionan con el  $\text{Ca(OH)}_2$  formando un gel C-S-H secundario y estratlingita ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ).<sup>[31]</sup>

Las arcillas calcinadas se emplean en construcciones en concreto para uso universal, de la misma manera que las otras puzolanas. Las arcillas calcinadas se pueden utilizar como substitutas parciales del cemento, normalmente entre 15% y 35% y también para aumentar la resistencia al ataque de sulfato, controlar la reactividad álcali-agregado y reducir la permeabilidad. Su masa específica relativa es de 2.40 a 2.61 y su finura Blaine es de 650  $\text{m}_2/\text{kg}$  a 1350  $\text{m}_2/\text{kg}$ . El esquisto calcinado puede contener del 5% al 10% de calcio, resultando en un material con alguna propiedad cementante o hidráulica. Debido a la cantidad de calcita residual, la cual no es totalmente calcinada, y a las moléculas de agua adsorbida en el mineral de arcilla, el esquisto calcinado tiene una pérdida por ignición del 1% al 5%. La pérdida por ignición del esquisto calcinado no es una medida o indicación de la cantidad de carbono, como podría ser en la ceniza volante.

La metacaolinita, una arcilla calcinada especial, se produce por la calcinación a baja temperatura de la arcilla caolin de alta pureza. El producto se muele hasta un tamaño de partícula promedio de cerca de 1 a 2 micrómetros. La metacaolinita se usa en aplicaciones especiales, donde se necesite baja permeabilidad y muy alta resistencia. En estas aplicaciones, la metacaolinita se usa mucho más como un aditivo (adición) al concreto que como un sustituto del cemento. La adición típica es de aproximadamente 10% de la masa del cemento. Las puzolanas naturales se clasifican por la ASTM C 618 (AASHTO M 295) como puzolana Clase N.<sup>[11]</sup>

Las propiedades desarrolladas en morteros al incorporar materiales puzolánicos arcillosos dependen de la cantidad además de las características de los componentes, del medio de activación o del uso de agentes alcalinos aunado al tiempo de exposición del tratamiento térmico con el objeto de obtener un material cementicio cuya estructura puede ser amorfa o cristalina resultante de la reacción de hidratación además de la influencia en la zona de interface y en el desarrollo de una matriz homogénea. Estos materiales presentan una combinación de propiedades similares a materiales cerámicos (dureza y resistencia a alta temperatura) y cementicios (pastas y ligantes)<sup>[54-56]</sup>.

Otro material con potencial puzolánico es el residuo de la producción de energía eléctrica mediante la extracción de calor del subsuelo, en las plantas geotérmicas a base de salmuera. La práctica de esta tecnología se ha incrementado considerablemente en años

recientes, debido a que es una fuente de energía limpia, generalmente renovable, y de menor costo relativo a otras formas de generación de energía <sup>[57]</sup>.

Dicho desecho, denominado Desecho Geotérmico (DG), es obtenido de la mezcla de salmuera y vapor (presurizados naturalmente), que pasa a través de diferentes etapas de extracción de calor. Conforme la temperatura se reduce (inicialmente ~200 °C), de la mezcla se precipita sílice amorfa de tamaño manométrico, junto con cloruros de sodio y potasio. El precipitado causa serios problemas ya que se deposita en las tuberías como una cascarilla que crece varias pulgadas por mes y debe ser removida periódicamente <sup>[58]</sup>. Además de estas incrustaciones, una fracción de salmuera remanente se reinyecta al subsuelo y el resto se deposita en lagunas de evaporación que contienen miles de toneladas de este DG. La planta geotérmica de Cerro Prieto en Baja California, México, genera aproximadamente 50.000 toneladas anuales de este DG, el cual no tiene hoy una aplicación. En base a esto, el objetivo de este trabajo fue el de estudiar al DG como reemplazo del CPO lo cual puede presentar una solución al gran problema ecológico que representa actualmente. <sup>[59]</sup>

En varias investigaciones se ha determinado que el DG acelera la hidratación de la cemento portland, el aumento de la reactividad de la alita y belita, y que posiblemente, las partículas del DG sirven como sitios de nucleación. Estos factores dieron lugar a la mejora de la resistencia a la compresión durante el período de tiempo de las pruebas (90 días). <sup>[60, 61]</sup>

#### **2.6.4 Pruebas de caracterización de las puzolanas**

La caracterización consiste en la obtención de información acerca de un material bajo estudio (composición, estructura, topología, topografía, morfología, propiedades en general) a partir de la interacción de una señal (eléctrica, luminosa, térmica, etc.) con una porción de dicho material. Por tanto, toda caracterización de un material supone una agresión al mismo, es decir, una perturbación del mismo. El estudio de la respuesta del material a dicha perturbación nos permite conocer las propiedades o más concretamente, las peculiaridades del mismo. A veces se suele confundir el término caracterización con el de análisis. Toda caracterización implica realizar un análisis del material, sin embargo no todo análisis implica realizar una caracterización.

Algunas de las técnicas de caracterización actualmente utilizadas son: Microscopia Electrónica de Barrido para la generación de imágenes de alta y baja resolución que permite observación de la morfología de materiales sólidos orgánicos e inorgánicos;

*Mauricio Arreola Sánchez*

Microscopía Óptica sirven de apoyo para la caracterización de materiales como metales, polímeros, cerámicos y compuestos, ayuda en la identificación de la microestructura, cuantificación de fases, tamaño de grano, entre otros parámetros de microestructura; La difracción de rayos X es una técnica analítica no destructiva para la identificación y determinación cualitativa de las varias formas cristalinas, conocidas como "fases" de componentes presentes en muestras pulverizadas o sólidas; solo por mencionar algunas. [62]

Como ya se mencionó, en la descripción anterior de los diversos materiales puzolánicos, las características más importantes de todos estos materiales, para que tengan un buen desempeño como materiales suplementarios son su composición química, sus características mineralógicas y su finura y forma de partícula.

Las técnicas para determinar dichas características son fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X, distribución del tamaño de partícula y Microscopia electrónica de barrido.

### **Fluorescencia de rayos X**

La fluorescencia de rayos X, es una prueba espectrométrica que permite conocer la composición química de una muestra analizando la emisión de rayos X de los elementos presentes en ella. Las muestras a analizar pueden ser líquidas o sólidas. Una de las ventajas de este tipo de análisis, es que son pruebas "no destructivas". A nivel de cerámica, es una de las formas utilizadas para determinar la composición por óxidos de una arcilla o de una pasta cerámica. [63]

El fundamento de la Fluorescencia de rayos-X radica en la existencia de un sistema atómico con distintos niveles de energía y las posibles transiciones electrónicas entre ellos.

La base de la técnica analítica de la Fluorescencia de rayos-X por dispersión en longitud de onda (WDFRX) es la medida de la energía de la radiación emitida en estas transiciones energéticas y es conocida como fluorescencia de rayos-X. El fenómeno de fluorescencia de rayos-X se puede describir en dos etapas: a) Excitación y b) Emisión.

#### **a) Excitación**

Si se considera un sistema en su estado fundamental, es decir de menor energía, al aplicarse una energía de una magnitud suficiente, ésta puede ser absorbida por el sistema, pasando éste a un estado de mayor energía o estado excitado debido a la salida de

*Mauricio Arreola Sánchez*

electrones del átomo. A la excitación producida por rayos X que provienen del tubo de rayos-X, se le llama radiación primaria o fotones de rayos-X primarios.

#### b) Emisión

Los estados excitados son inestables, y el átomo tiende a volver a su estado fundamental, para lo cual se producen saltos de electrones desde los niveles más externos hacia los niveles más internos, para ocupar los huecos producidos. Este proceso produce desprendimiento de energía en forma de radiación de rayos-X secundaria llamada fluorescencia de rayos-X.<sup>[64]</sup>

#### **Difracción de rayos X**

Si el análisis químico permite determinar los elementos y compuestos químicos presentes en una muestra, la difracción de rayos X permite identificar los minerales y fases cristalinas en general, ya sean de origen natural o artificial. De todos modos solamente permite un análisis semi-cuantitativo.

En el ámbito que nos ocupa, es necesario diferenciar entre compuesto químico y fase cristalina. Y ello es así porque a menudo un mismo compuesto puede presentarse en estado sólido bajo diferentes estructuras cristalinas. En este caso, cada estructura cristalina es una fase diferente (un mineral diferente si tratamos con minerales). A este fenómeno se le denomina polimorfismo. Pues bien, mientras que el análisis químico no será capaz de diferenciar entre las diferentes fases, puesto que se trata del mismo compuesto químico, la difracción de rayos X sí podrá identificar sin ambigüedad cada una de ellas porque esta técnica está relacionada precisamente con la estructura cristalina. Así, compuestos como el óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y el carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), tan abundantes en la naturaleza y en los materiales de construcción, ya sean en monumentos antiguos o en edificaciones modernas, presentan un polimorfismo muy variado.

Se trata de una técnica de uso muy extendido en numerosos campos como la Geología, la Química, la Ciencia e Ingeniería de Materiales y un largo etcétera, disponiendo de aparatos de difracción de rayos X la mayoría de laboratorios en universidades, centros de investigación e industrias modernas que se dedican a temas donde intervienen materiales cristalinos.

#### **NATURALEZA Y PRODUCCIÓN DE RAYOS X**

Los rayos X son ondas electromagnéticas como lo son las de la luz visible, aunque de muy menor longitud de onda ( $\lambda$ ) que éstas. Se consideran rayos X las longitudes de onda comprendidas entre 1 y 100 Å, aunque para la difracción de materia cristalina se utiliza el extremo inferior de este intervalo. Ello es debido a que las distancias que separan los

*Mauricio Arreola Sánchez*

átomos en las estructuras cristalinas son del orden de 1 Å. Téngase en cuenta que  $1\text{Å} = 10^{-10}\text{m} = 10^{-8}\text{cm}$ .

Los rayos X se obtienen comúnmente mediante los denominados tubos de rayos X, que forman parte del propio aparato de difracción o difractómetro de rayos X. Para la producción u obtención de los rayos X el tubo debe estar sometido a una elevada tensión, de 50 kilovoltios o más. Otro de los requerimientos importantes es la refrigeración del tubo de rayos X que normalmente se realiza mediante un circuito cerrado de agua en constante circulación. Cada tubo de rayos X emite unas determinadas longitudes de onda, de las que se aprovecha la más intensa denominada  $K\alpha$ . El tubo más comúnmente utilizado para materiales inorgánicos es el tubo de cobre, metal que emite la radiación  $K\alpha$  de longitud de onda  $\lambda = 1.542\text{Å}$ .<sup>[65]</sup>

### **Distribución y tamaño de partícula**

Conocer el tamaño de las partículas con las que se trabaja resulta de gran interés ya que dependiendo de las aplicaciones, existen tamaños óptimos. Por otro lado hay que decir que no sólo es importante el tamaño de las partículas si no también su distribución, es decir, si son mono o polidispersas. Cuando todas las partículas que forman parte de una muestra presentan un tamaño igual o similar se consideran monodispersas mientras que si por el contrario, presentan una gran variabilidad, dan lugar a un índice de polidispersidad.

El análisis de ambos parámetros resulta muy interesante tanto desde el punto de vista de las aplicaciones como de la síntesis de las partículas, ya que ayuda a entender qué ocurre durante la optimización de los procesos cuando ciertos parámetros son modificados. Se dispone de varios equipos, con bases diferentes, que permiten determinar ambas características.<sup>[66]</sup>

#### *Dispersión de luz dinámica (DLS)*

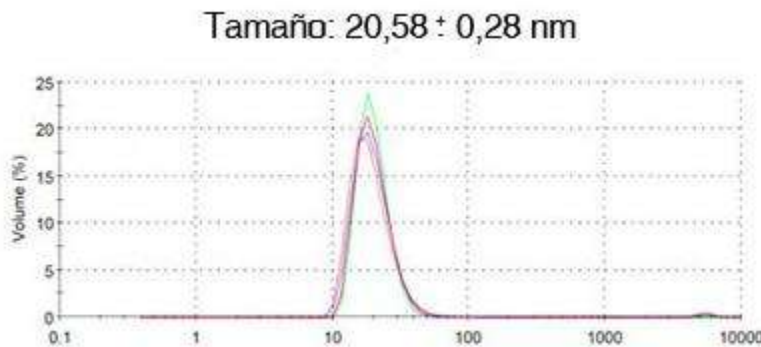
Mediante esta técnica se puede determinar tanto el diámetro hidrodinámico de un material en suspensión como la distribución de tamaños por medio de medidas del movimiento browniano de las partículas.

Cuando se tienen partículas en solución, éstas se desplazan de manera aleatoria como consecuencia de los choques con el medio en el que están inmersas (movimiento browniano). Al hacer incidir un haz de luz sobre estas partículas es dispersado y su intensidad varía con el tiempo debido al movimiento browniano. Utilizando varios algoritmos matemáticos se puede relacionar esta variación en la intensidad con el tamaño



hidrodinámico de las partículas. Parámetros como la temperatura y la viscosidad del disolvente, entre otros, influyen en el tamaño y éste, a su vez, depende tanto de la forma de la partícula como de las interacciones con las moléculas del medio en el que se encuentra.

Los datos proporcionados aparecen en términos de intensidad de luz dispersada en función del tamaño (intensidad) aunque es posible determinar el diámetro hidrodinámico en distribución de volumen o de número (grafica 2-7).<sup>[67]</sup>



Grafica 2-7. Tamaño y distribución de partículas por DLS.<sup>[67]</sup>

#### Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

Esta técnica permite determinar el tamaño, la distribución de tamaño y la forma (imagen de las partículas).

La microscopía electrónica de transmisión se basa en la irradiación de una muestra con un haz de electrones acelerados. Estos electrones son generados en el cañón del microscopio a través de un sistema de lentes electromagnéticas (condensadoras) y se aceleran por una diferencia de potencial en condiciones de vacío para evitar la interacción con el aire. El haz creado, se dirige hacia la muestra a través de otro sistema de lentes electromagnéticas objetivo y tras la interacción, el haz que contiene los electrones que atraviesan la muestra (transmitidos) es aumentado y proyectado por las lentes proyectoras. Finalmente, se obtiene la una imagen sobre una pantalla fluorescente, una película fotográfica o una cámara CCD. Utilizando esta técnica, se pueden obtener resoluciones de hasta 1.9 Å.<sup>[68]</sup>

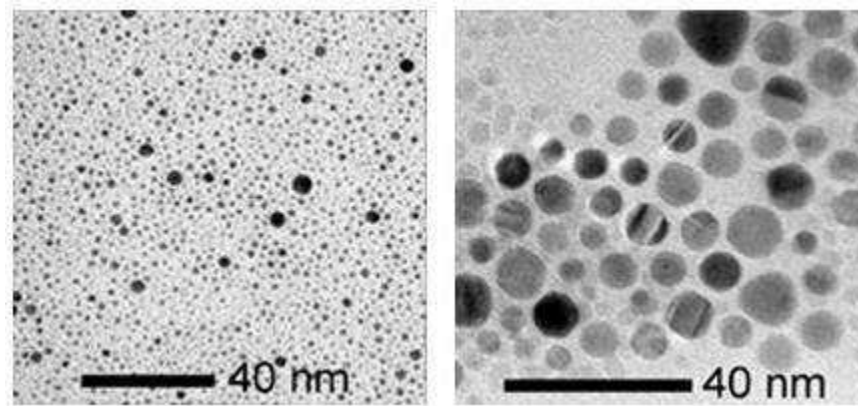


Imagen 2-6. Forma de partículas por TEM. <sup>[68]</sup>

### *Microscopía Electrónica de barrido (SEM)*

Al igual que el TEM, esta técnica permite determinar el tamaño, la distribución de tamaño y la forma de las partículas.

Esta técnica consiste en el escaneo punto a punto de una muestra que es irradiada con un haz de electrones de alta energía. La información tanto topográfica como morfológica, conformacional y cristalográfica es obtenida a través del análisis de los electrones deflectados tras la interacción con la muestra. Estos microscopios constan de una fuente de electrones que los acelera desde 0.5 a 30eV y se puede realizar medidas en vacío como en atmósfera húmeda. Dependiendo de las condiciones de medida, se pueden obtener resoluciones de entre 10 y 0.8 nm.

En la microscopía electrónica de barrido, los electrones interactúan con la muestra, penetran hasta una determinada profundidad e ionizan los núcleos atómicos. Como consecuencia, los electrones de los enlaces químicos son liberados y recogidos en un detector. Así aparecen píxeles brillantes en la pantalla de observación de tal manera que la intensidad de cada uno de ellos es directamente proporcional a la cantidad de electrones arrancados de la muestra. De esta manera la imagen se obtiene como un mapa de distribución de intensidades de la señal emitida por cada área escaneada del material.

Por otro lado el empleo de la técnica EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) acoplada a estos microscopios proporciona información sobre la composición del material. <sup>[69]</sup>

## CAPÍTULO 3. MATERIALES SUJETOS A ESTUDIO

### 3.1 Elección de materiales puzolánicos

Para la presente investigación se realizó una búsqueda de diversos materiales disponibles tanto geográficamente como comercialmente; durante este sondeo se encontraron 10 materiales potencialmente puzolánicos. Dichos materiales se ordenaron según sus características de origen en cuatro grupos: Materiales de alta temperatura, Cenizas orgánicas, Residuos industriales y Fibras orgánicas.

#### 3.1.1 Materiales de alta temperatura

Como ya se mencionó en el capítulo de puzolanas, dentro de las puzolanas naturales existen materiales que después de sufrir calentamiento (activación térmica) su potencial reactivo se incrementa considerablemente. Para el presente trabajo se estudiaron cuatro de este tipo de materiales, los cuales se describen en seguida.

##### Metacaolín (MK)

El Metacaolín (MK) es un producto de síntesis, manufacturado mediante la calcinación del caolín, de gran finura (hasta 1-2  $\mu\text{m}$ ) y con elevada actividad puzolánica <sup>[70]</sup>. El caolín está constituido en esencia por silicatos aluminicos hidratados <sup>[71]</sup>, las especies mineralógicas comúnmente presentes son principalmente caolinita ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), alunita ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), feldespato potásico ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) <sup>[72]</sup>.

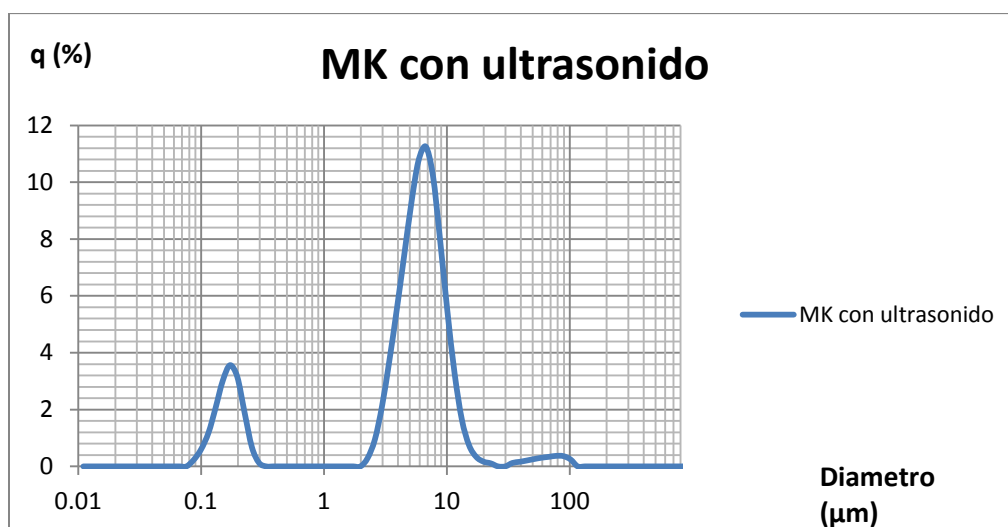
El metacaolín (MK) se obtiene de la calcinación del caolín a  $\approx 750^\circ$  <sup>[73]</sup>, el tiempo y temperatura de exposición son factores determinantes en la transformación <sup>[74]</sup>. Durante la calcinación, la caolinita pierde la lámina de OH, y transforma a metacaolinita, la red de Si-O permanece intacta y la red de Al-O se colapsa; el Mc resultante tiene una estructura altamente desordenada y su alto contenido de energía interna lo hace potencialmente reactivo como aditivo para el CP. <sup>[75,76]</sup>

La presencia del metacaolín, en una pasta de cemento, reduce la microporosidad de la matriz de productos de reacción, atribuido al consumo de CH en la reacción puzolánica en combinación con la el efecto de microrellenador; el cuarzo del metacaolín participa como relleno inerte en el refinamiento y reducción de la porosidad. <sup>[33]</sup>

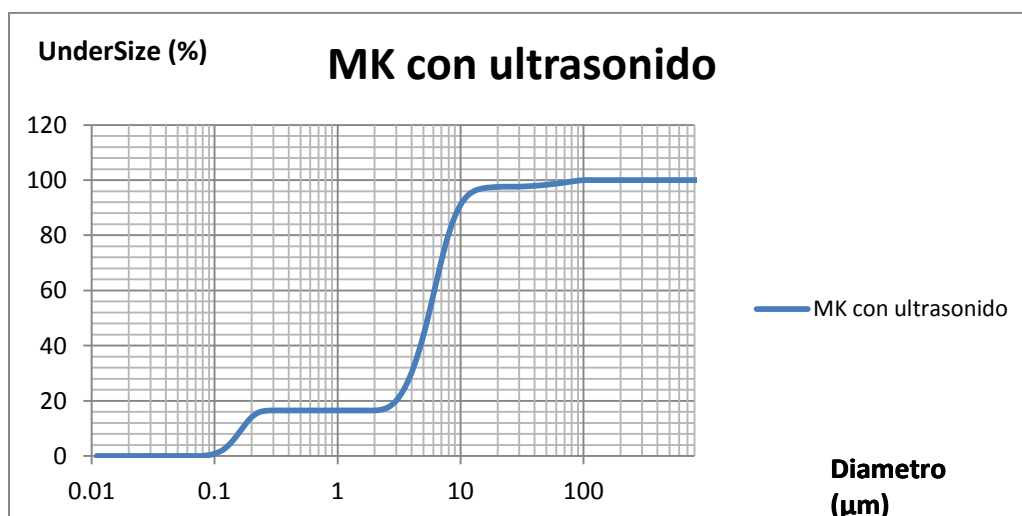
Otro uso del metacaolín es como cementante auxiliar en el yeso, estudios sobre el tema concluyen que la incorporación de los productos de reacción de BFS y MK en la microestructura de la estructura del yeso proporciona una resistencia mecánica aceptable y resistencia al agua, obteniendo un material que se puede utilizar en condiciones donde yeso comercial no es aconsejable, y también para usos distintos de la construcción.<sup>[77]</sup>

La caracterización del metacaolín empleado en esta investigación se presenta en seguida:

**TAMAÑO DE PARTÍCULA**



Grafica 3-1. Tamaño de partícula del MK.



Grafica 3-2. Distribución del tamaño de partícula del MK.

Mauricio Arreola Sánchez

En las gráficas anteriores (grafica 3-1 y 3-2) se muestra que el MK utilizado para este trabajo tiene una pequeña porción (20%) de partículas de entre 0.1 y 0.2 $\mu\text{m}$  y el resto de los tamaños se concentran entre 3 y 10 $\mu\text{m}$ .

#### DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En el difractograma del MK (imagen 3-1) se pudo verificar que el MK es casi en su totalidad amorfo, presentando solo una false cristalina clara identificada como Anatasa.

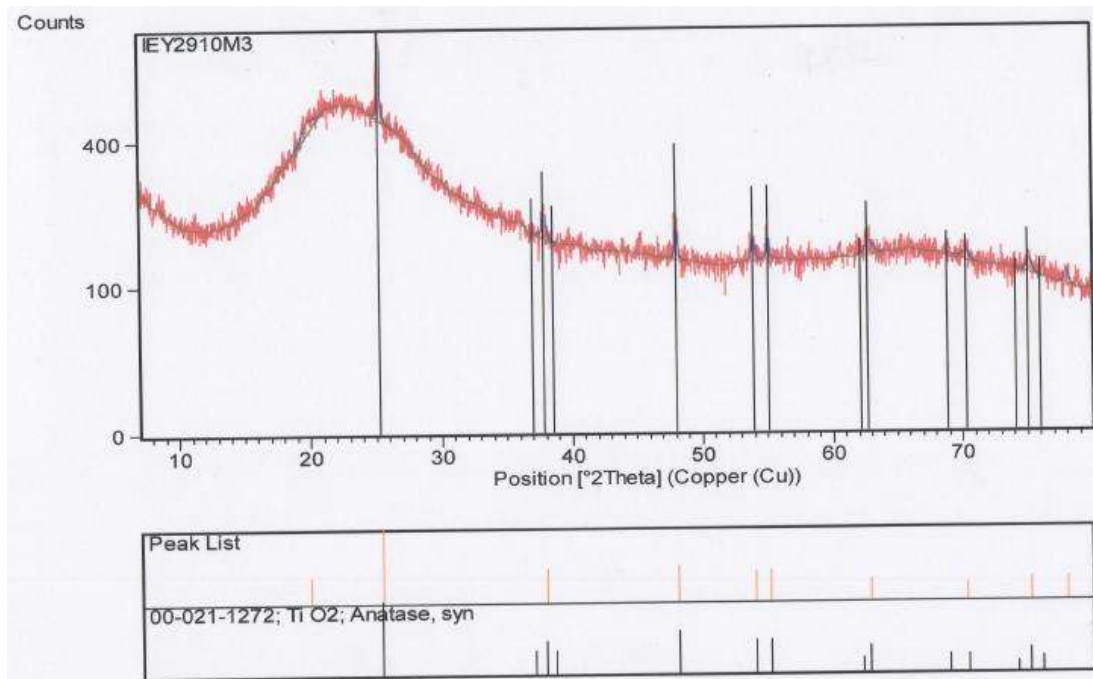


Imagen 3-1. Difractograma del MK

#### FLUORESCENCIA DE RAYOS X

En la prueba de fluorescencia, se obtuvo que el MK tiene un contenido de aluminosilicatos del 96.36% y un contenido de óxidos de hierro del 0.5%. Con lo cual se ratifica su alto potencial reactivo y se puede clasificar como una puzolana natural clase N.

Mauricio Arreola Sánchez

Tabla 3-1. Contenido aluminosilicatos del MK.

MK			
Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	51.09	SO <sub>3</sub>	0.036
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.27	ZrO <sub>2</sub>	0
TiO <sub>2</sub>	1.749	Cl	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.487	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.033
MgO	0	SrO	0
MnO	0	ZnO	0
CaO	0.032	PXC/PPI	0.913
Na <sub>2</sub> O	0.219	BaO	0
K <sub>2</sub> O	0.172	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0
<b>Suma = 100.001</b>			

#### FORMA DE LA PARTÍCULA

En la imagen 3-2, podemos observar que las partículas del MK tienen forma laminar delgada y se corrobora el tamaño de partícula menor a 10µm en la gran mayoría de ellas.

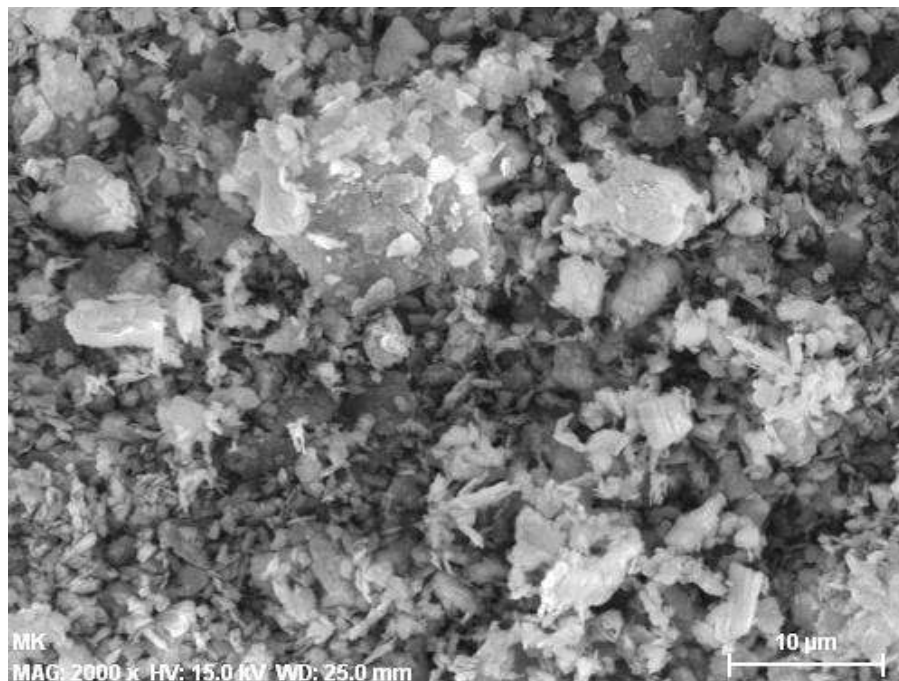


Imagen 3-2. Forma y tamaño de la partícula del MK.

Mauricio Arreola Sánchez

### Perlita Natural (PN)

La perlita es un mineral de origen volcánico que contiene agua molecular y se expande hasta 20 veces su volumen original, adquiere gran ligereza y capacidad aislante.

La perlita es un vidrio volcánico amorfo que tiene un contenido de agua relativamente alto. Es un mineral que aparece en la naturaleza, y tiene la propiedad poco común de expandirse muchísimo cuando se la calienta lo suficiente.

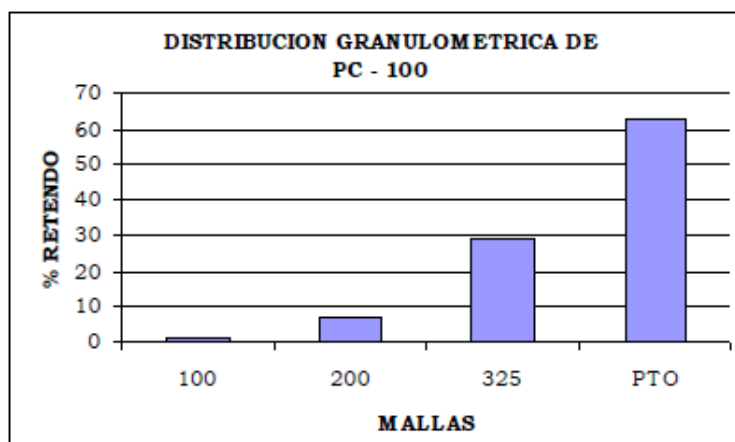
Cuando alcanza temperaturas de 850–900 °C, la perlita se ablanda (dado que es un vidrio). El agua atrapada en la estructura del material escapa y se vaporiza, y esto causa la expansión del material hasta 20 veces su volumen original. El material expandido es de un color blanco brillante, debido a la reflectividad de las burbujas atrapadas.

La perlita no expandida ("cruda o natural") tiene una densidad cercana a 1100 kg/m<sup>3</sup> (1,1 g/cm<sup>3</sup>).<sup>[78]</sup>

Tanto la perlita natural y la perlita expandida fueron facilitados por la empresa Termolita S.A.P.I de C.V.

### TAMAÑO DE PARTÍCULA

Respecto al tamaño de partícula, los datos proporcionados por el fabricante (grafica 3-3) se muestran en la distribución granulométrica, en la cual se puede apreciar como el 60% de los tamaños son del orden de 45 µm.



Grafica 3-3. Granulometría de la PN.

Mauricio Arreola Sánchez

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En el difractograma de la PN (imagen 3-3) se aprecia que su estructura es mayormente amorfa, salvo una o dos fases presentes, las cuales faltan de ser identificadas.

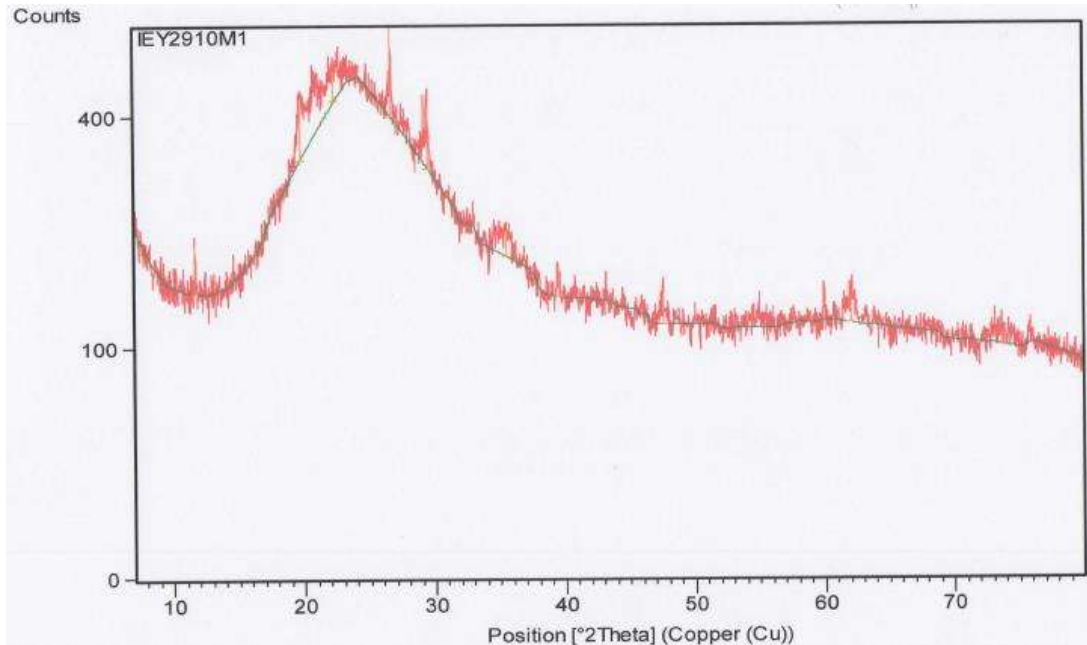


Imagen 3-3. Difractograma de la PN.

FLUORESCENCIA DE RAYOS X

En la tabla 3-2 se muestra la composición química de la PN en la cual el 73.3% son compuesto deseado para la actividad puzolánica. Según la ASTM C 618, se clasifica como una puzolana clase N.

Tabla 3-2. Composición química de la PN.

PN			
Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	72.197	CaO	1.052
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.115	Na <sub>2</sub> O	3.216
TiO <sub>2</sub>	13.58	K <sub>2</sub> O	4.285
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.011	PXC/PPI	3.99
MgO	0.538	BaO	0.000
MnO	0.073	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.025
Suma =100.082			

Mauricio Arreola Sánchez



### FORMA DE LA PARTÍCULA

En la imagen 3-4 se aprecia que la forma de partícula de la PN es angulosa, parecida a la del cemento portland, solo que de un tamaño mayor.

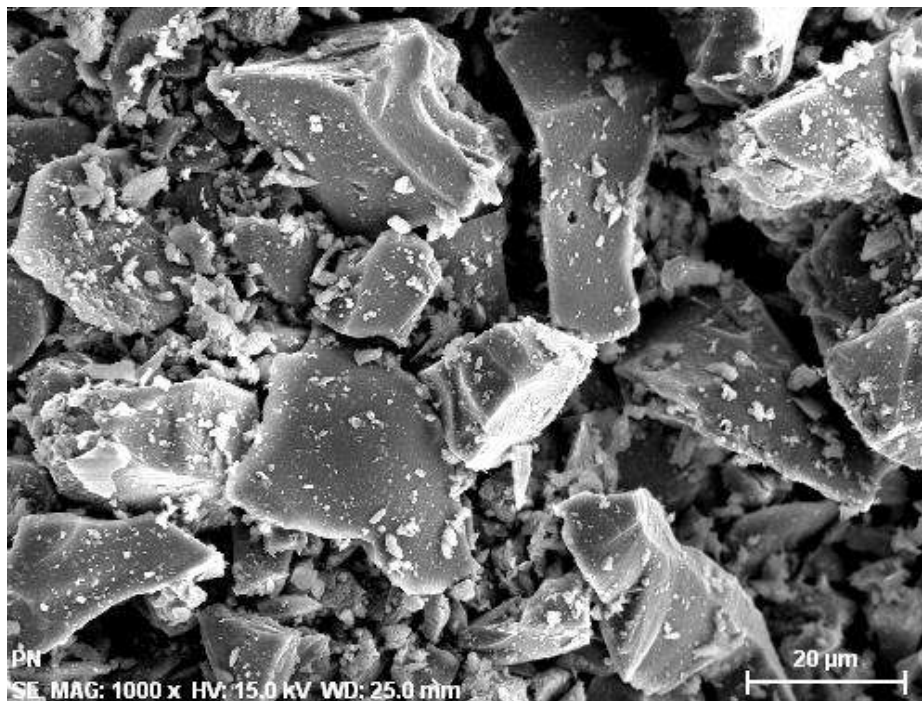


Imagen 3-4. Forma de partícula de la PN.

### Perlita Expandida (PE)

Los materiales de construcción incorporados con materiales porosos tales como perlita expandida, de espuma de plástico y cenizas volantes expandida se han utilizado durante mucho tiempo. Estos materiales porosos tienen una estructura de poros interconectados y son estables químicamente. Además, son baratos y son recursos abundantes.<sup>[79]</sup>

La adición de perlita expandida, agregado liviano, se sabe que reduce significativamente la densidad de los morteros a base de cemento y mejorar sus propiedades térmicas<sup>[80]</sup>, resistencia a la congelación-descongelación<sup>[81]</sup> y las propiedades acústicas<sup>[82]</sup>. La perlita es una forma amorfa de magma riolítica o dacítico que contiene 2-5% de agua<sup>[83]</sup>. Su uso en los elementos estructurales se ha promovido en los miembros de carga dinámica, donde en el consiguiente descenso en el peso del concreto se espera para limitar los daños durante los terremotos<sup>[84]</sup>, sobre todo después de refuerzo adecuado con fibras. En la mayoría de los estudios, la perlita se ha utilizado como un reemplazo para el cemento

*Mauricio Arreola Sánchez*

Portland, como un relleno microscópico ligero o para reemplazar una porción de la arena. Si bien se reconoce su actividad puzolánica, su papel en morteros ligeros es en gran parte la de un agregado inerte.<sup>[85]</sup>

#### TAMAÑO DE PARTÍCULA

La PE fue proporcionada por la empresa Termolita S.A.P.I de C.V. misma que la tiene clasificada como "MICROSIL 325 S", el cual tiene un tamaño partícula controlado de 44 $\mu$ m; es decir que pasa la malla N° 325, según la ficha técnica del producto.

#### DIFRACCIÓN DE RAYOS X

A diferencia de la PN, en el difractograma de la PE (imagen 3-5) se aprecia que es completamente amorfa, lo cual le da un alto potencial reactivo.

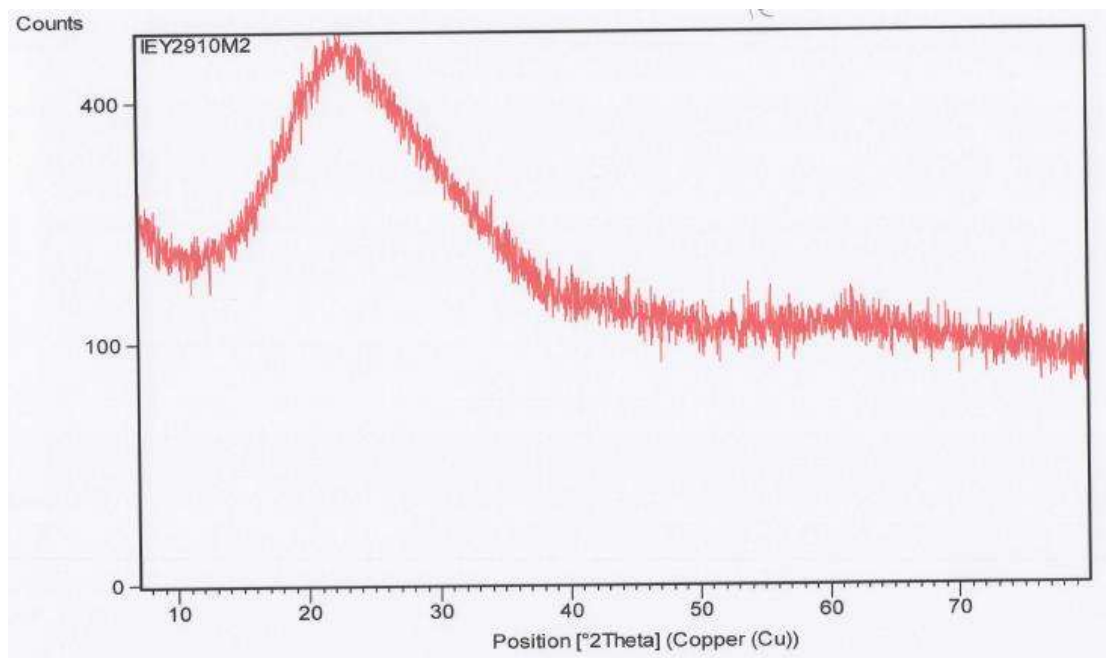


Imagen 3-5. Difractograma de la PE.

#### FLUORESCENCIA DE RAYOS X

En los resultados de fluorescencia de la PE (tabla 3-3) se determinó que contiene un 88.3% de compuestos deseados para actividad puzolánica y con los resultados de difracción de rayos X (imagen 3-5) se corrobora que el total de esos compuestos es amorfo por lo que la PE tiene un alto potencial puzolánico y se le puede clasificar como clase N.

*Mauricio Arreola Sánchez*

Tabla 3-3. Composición química de la PE.

PE			
Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	73.591	CaO	1.333
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	Na <sub>2</sub> O	2.918
TiO <sub>2</sub>	13.426	K <sub>2</sub> O	5.013
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.166	PXC/PPI	1.18
MgO	0.197	BaO	0
MnO	0.045	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02
Suma = 99.019			

*FORMA DE LA PARTÍCULA*

En la imagen se aprecia una forma esférica hueca de las partículas de PE, lo cual se debe al efecto del calentamiento y la migración del agua contenida en la perlita mineral.



Imagen 3-6. Forma de partícula de la PE.

*Mauricio Arreola Sánchez*

### **Ceniza de Carbón Mineral (CM)**

Este material proviene de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán, se localiza al sur del estado, en las coordenadas 17°57' de latitud norte y 102°12' de longitud oeste, a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con Arteaga, al este con el Estado de Guerrero, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con Aquila. Su distancia a la capital del Estado es de 401 km.

El carbón se utiliza como fuente de energía para la producción del cemento. Se necesitan grandes cantidades de energía para producir cemento. Los hornos suelen quemar carbón en forma de polvo y consumen unos 450g de carbón por cada 900g de cemento producido.<sup>[86]</sup> Otro de los usos que se le ha dado al coque o carbón mineral es en la elaboración de morteros conductores; algunas de las aplicaciones que se le han dado a morteros conductores y pastas de cemento incluyen su utilización como elementos en la puesta a tierra de sistemas eléctricos en edificios, protección contra rayos, sistemas de descongelamiento en caminos y puentes, monitoreo de tráfico, apantallamiento electromagnético en edificios, sensores de deformación y pisos conductores para disipación de cargas electrostáticas, así como la utilización como ánodo en técnicas electroquímicas para el control de la corrosión<sup>[87]</sup> y en la realcalinización electroquímica de concreto reforzado.<sup>[88]</sup>

#### *TAMAÑO DE PARTÍCULA*

El carbón mineral utilizado en esta investigación fue proporcionado en forma granular, por lo que se molió hasta quedar una forma fina, que pase la malla N°200 (80 µm).

#### *DIFRACCIÓN DE RAYOS X*

#### **Por el momento no se cuenta con el análisis de rayos del CM**

#### *FLUORESCENCIA DE RAYOS X*

No fue posible hacer el análisis de la composición química del CM ya que las pérdidas por calcinación del mismo fueron del 86%.

#### *FORMA DE LA PARTÍCULA*

La forma de partícula del CM (imagen 3-7) es muy parecida a la de la PN, son formas angulares de tamaños variados.

*Mauricio Arreola Sánchez*

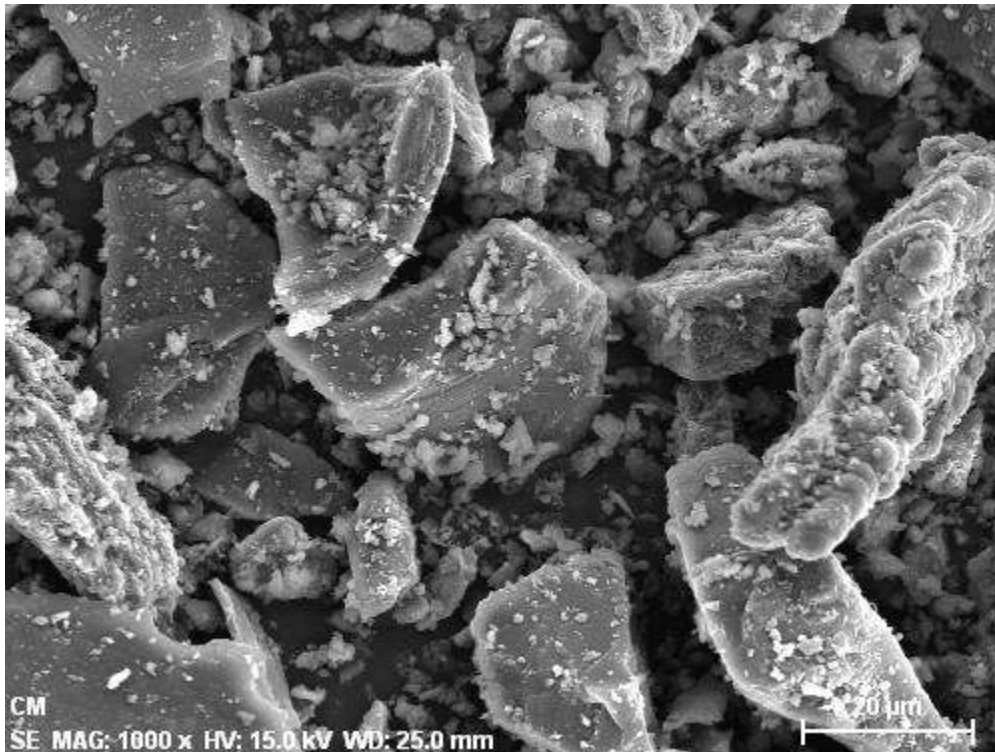


Imagen 3-7. Forma y tamaño de partícula del CM.

### 3.1.2 cenizas orgánicas

Dentro de este grupo de materiales puzolánicos a estudiar, se consideraron aquellos materiales que son un subproducto de alguna actividad agroindustrial en la cual se lleva a quemado algún material orgánico para la obtención de energía calorífica. Los subproductos son cenizas que por sus condiciones de quemado podrían tener potencial reactivo.

#### **Ceniza de Bagazo de Caña (CBC)**

La industria azucarera utiliza grandes cantidades de bagazo de caña como combustible para proveer de energía eléctrica y calorífica a sus fábricas, como resultado de esta operación se obtienen también cantidades importantes de ceniza de bagazo de caña (CBC). México es uno de los países líderes en el cultivo de caña de azúcar, ocupando el 5<sup>to</sup> lugar a nivel mundial. En el periodo 2008-2009 se produjeron 42 millones de toneladas de caña de azúcar, de los cuales se obtuvieron 12 millones de toneladas de bagazo de caña.

[89]



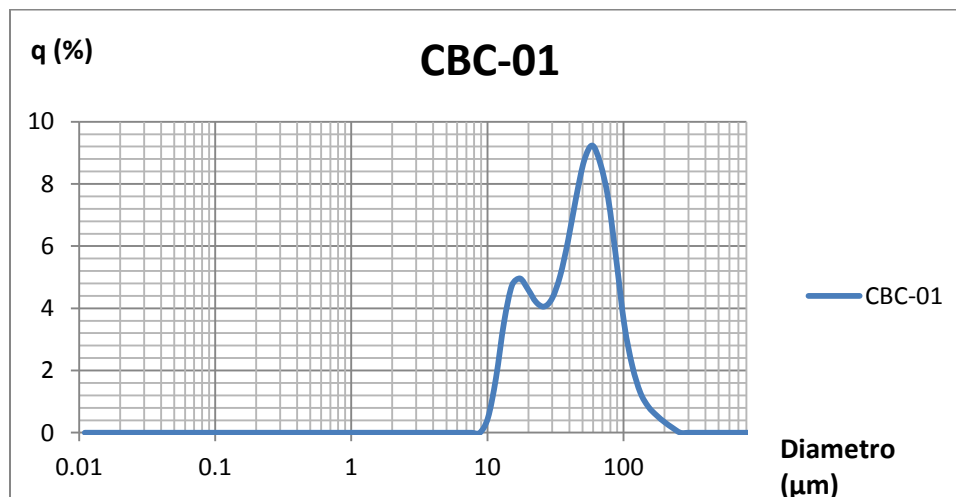
La ceniza de bagazo de caña (CBC) es uno de los principales subproductos generados en todo el mundo y puede ser utilizado como un aditivo mineral debido principalmente a su alto contenido en sílice ( $\text{SiO}_2$ )<sup>[90]</sup>, generalmente en cantidades superiores al 60% en masa. De acuerdo con las condiciones de cocción adoptadas, es posible mantener la sílice contenida en el bagazo en estado amorfo.<sup>[91]</sup>

La utilización como puzolana de los desechos de la agricultura requiere calcinación previa, pero la actividad puzolánica varía sustancialmente como resultado de las condiciones de calcinación y la naturaleza de los materiales de origen. Es así, que existen resultados contradictorios acerca de la efectividad puzolánica de la ceniza del bagazo de caña de azúcar, que se atribuyen al empleo de diferentes temperaturas de calcinación.<sup>[92]</sup>

El material de Ceniza de Bagazo de Caña se logró obtener gracias al apoyo del Ingenio de Azúcar “Lázaro Cárdenas”, que está ubicado en las afueras del poblado de Taretan en el estado de Michoacán y cuya principal actividad es la producción de azúcar estándar y refinada.

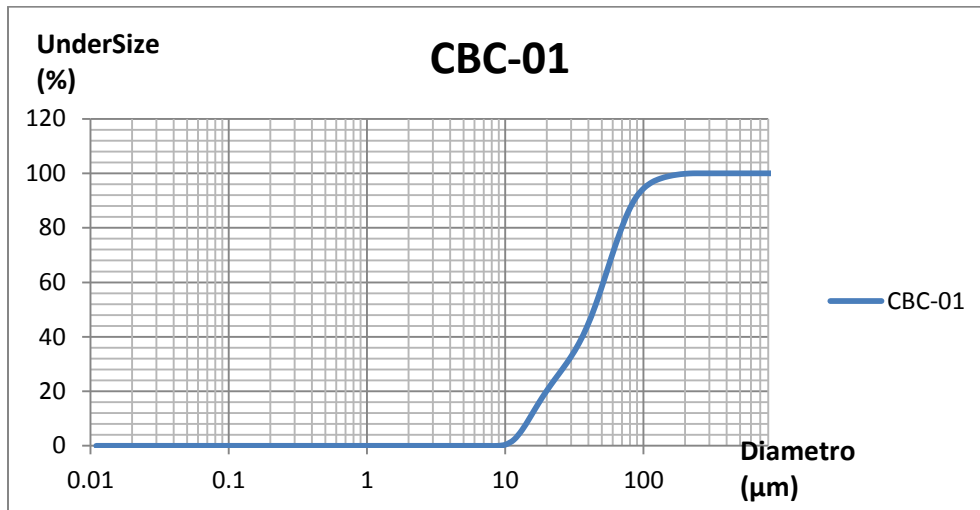
#### TAMAÑO DE PARTÍCULA

En las gráficas 3-4 y 3-5 se aprecia que la CBC tiene una distribución uniforme de tamaños de entre 10 y 100  $\mu\text{m}$ . La CBC usada en esta investigación fue previamente cribada para eliminar el carbón y las partículas gruesa, y solo se utilizó el material que paso la malla N°200 (80  $\mu\text{m}$ ).



Gráfica 3-4. Tamaño de partícula de la CBC.

Mauricio Arreola Sánchez



Grafica 3-5. Distribución del tamaño de partícula de la CBC.

#### DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En el análisis de fases de la CBC (imagen 3-8) se determinó una estructura completamente amorfa de la ceniza, lo cual la coloca como una ceniza con alto potencial puzolánico, al igual que la PE y el MK.

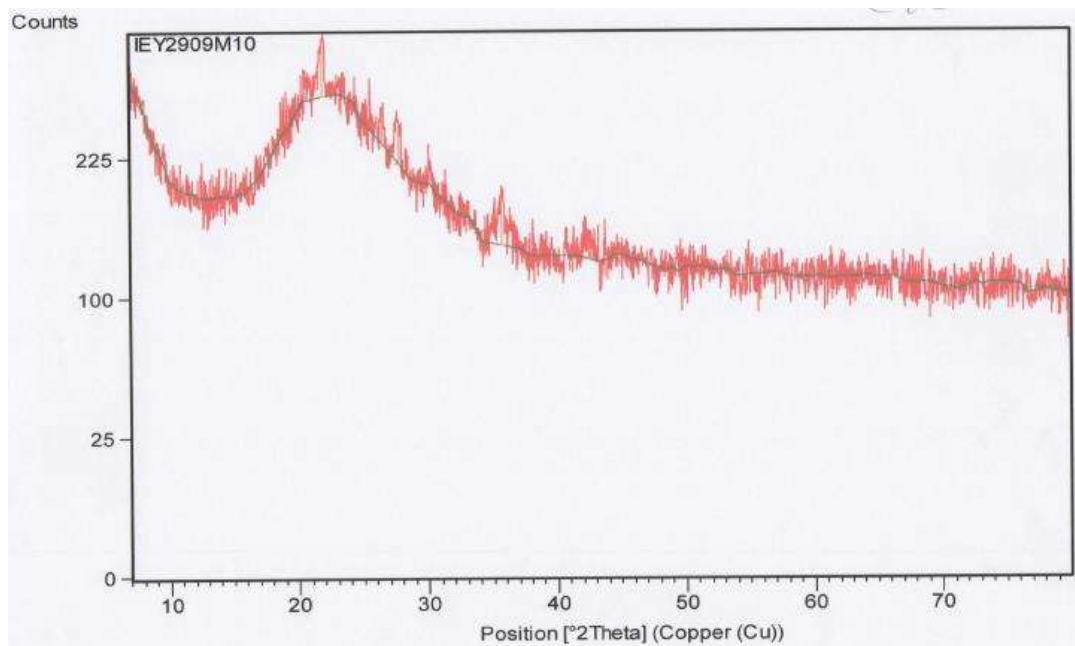


Imagen 3-8. Difractograma de la CBC.

*Mauricio Arreola Sánchez*

FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Los resultados de la composición química de la CBC (tabla 3-4) muestran que el contenido de óxidos deseados para la actividad puzolánica es del 66.4% lo cual permite clasificarla como una puzolana tipo C.

Tabla 3-4. Composición química de la CBC.

CBC			
Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	56.62	SO <sub>3</sub>	0.244
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.293	ZrO <sub>2</sub>	0
TiO <sub>2</sub>	0.422	Cl	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.488	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
MgO	1.573	SrO	0.057
MnO	0.227	ZnO	0
CaO	2.013	PXC/PPI	26.65
Na <sub>2</sub> O	0.24	BaO	0
K <sub>2</sub> O	2.178	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0
Suma = 100.005			

FORMA DE LA PARTÍCULA

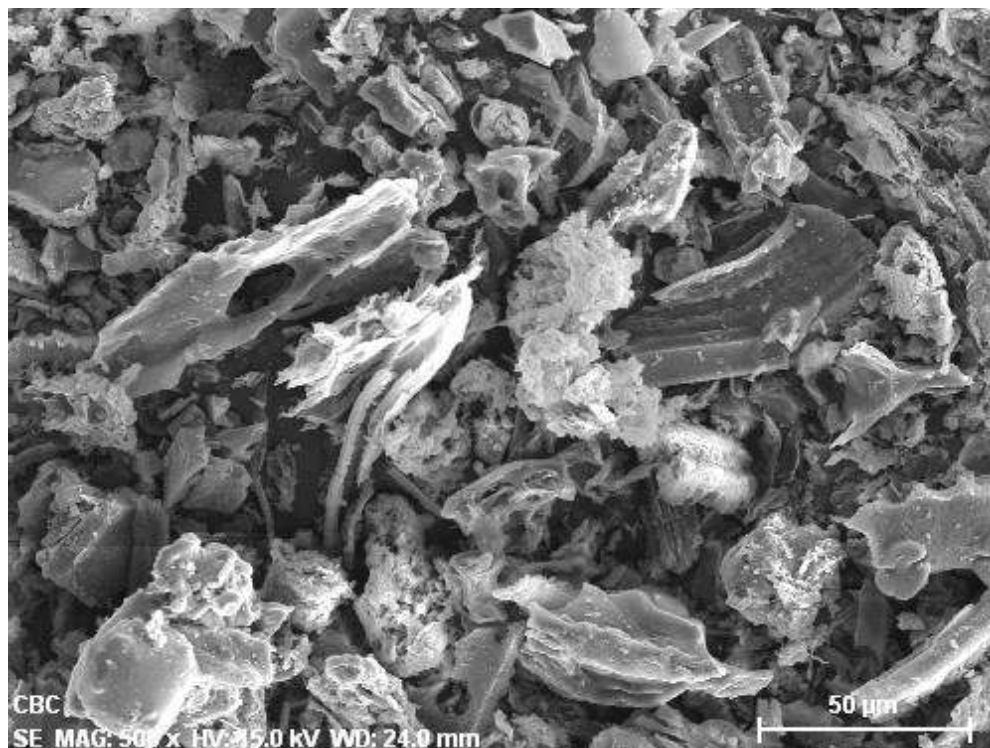


Imagen 3-9. Forma y tamaño de partícula de la CBC.

Mauricio Arreola Sánchez



Como se puede observar en la imagen 3-9, la forma de las partículas de la CBC es muy diferente a la de los materiales mostrados hasta el momento en este capítulo. Lo anterior se debe a que esta ceniza es de origen orgánico y más en especial es producto de la quema de las fibras de la caña de azúcar (bagazo resultado de la molienda de la caña) por lo que las partículas también son alargadas en forma de fibras, lo que incrementa su área superficial y por tanto su reactividad.

### Ceniza de Carbón Vegetal (CCV)

Como ya se mencionó en el apartado de justificación del presente trabajo, según datos de la SAGARPA, la producción de carbón vegetal en nuestro país es en promedio de 262,320 M<sup>3</sup>r/año y de leña es de 336,857 M<sup>3</sup>r/año. [9] Se estima que de cada metro cúbico de leña destinada a la producción del carbón vegetal, aproximadamente de un 6 a un 10% se convierte en CCV.

La Ceniza de Carbón Vegetal para este trabajo de investigación se obtuvo del poblado de Cuto de la Esperanza, el cual se encuentra localizado en el Municipio de Morelia del Estado de Michoacán de Ocampo como se muestra en la imagen 3-10.

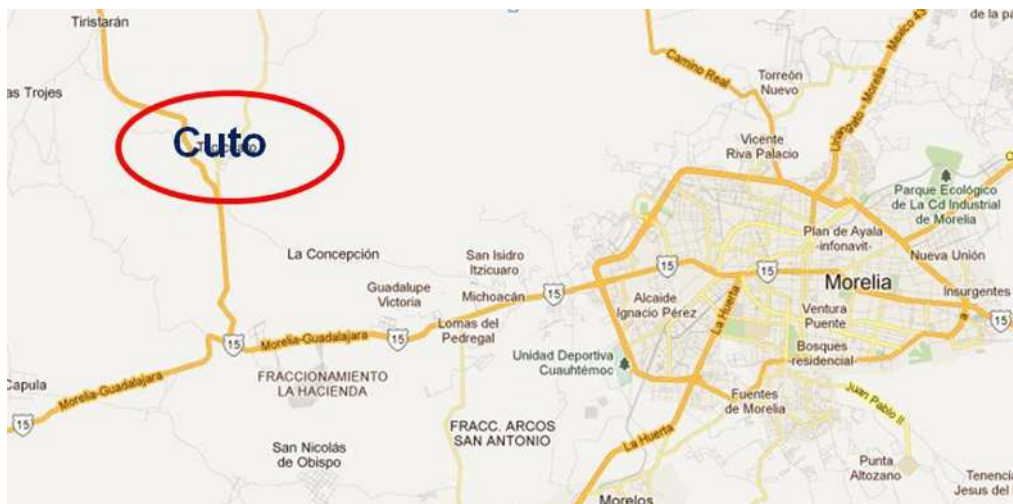


Imagen 3-10. Ubicación del sitio de obtención de la CCV. [93]

El proceso de fabricación de carbón como en cualquier quema de un producto, provoca la producción de ceniza del material que se consume. Es de esta manera es como se produce la Ceniza de Carbón Vegetal (CCV). Para la obtención de CVV basta con excavar en las chimeneas quitando el sobrante de la producción de carbón. Para facilidad del traslado la

ceniza se deposita en costales y se traslada al laboratorio como se muestra en la imagen 3-11.



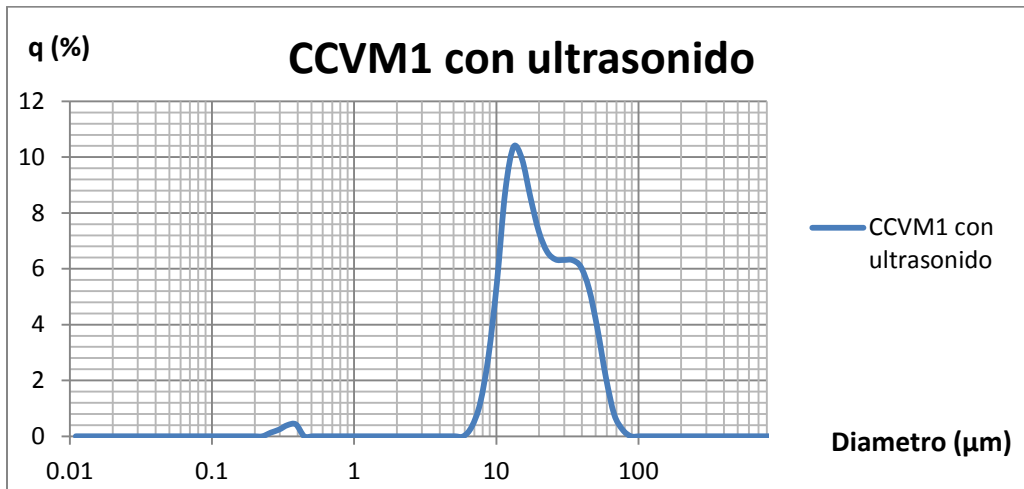
Imagen 3-11. Muestreo de la CCV.

De igual manera que la CBC la CCV fue tamizada para eliminar partículas gruesas y la mayor cantidad de carbón posible, y solo se utilizó el material que pasó la malla N°200 (80  $\mu\text{m}$ ).

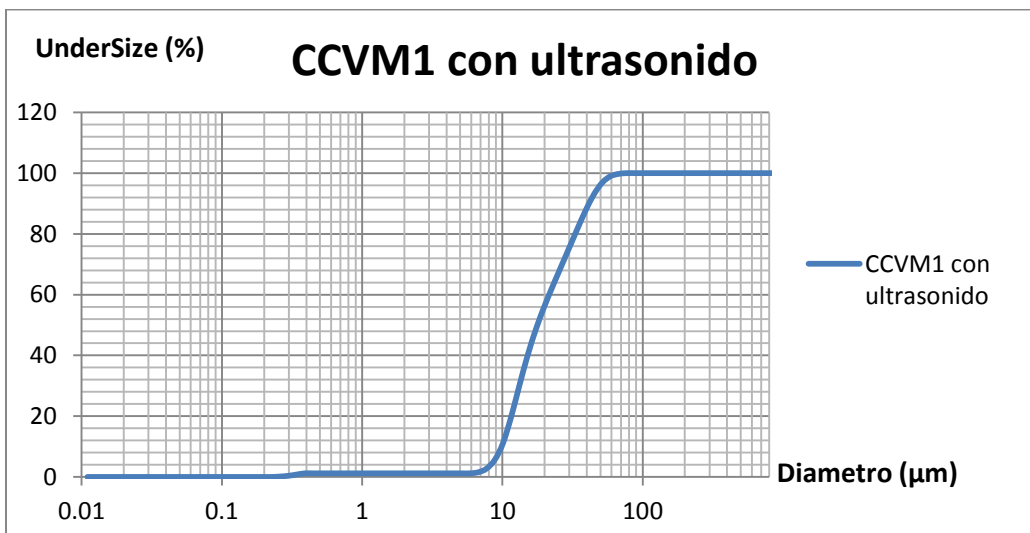
#### TAMAÑO DE PARTÍCULA

La distribución de partículas de la CCV (gráficas 3-6 y 3-7) varía en un rango de 7 a 60  $\mu\text{m}$ , con una muy pequeña cantidad de partículas de tamaño menor a 1  $\mu\text{m}$ .

*Mauricio Arreola Sánchez*



Grafica 3-6. Tamaño de partícula de la CCV.



Grafica 3-7. Distribución de partículas de la CCV.

### DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la imagen 3-12, se observan algunas faces cristalinas presentes en la CCV, las cuales son calcita y anortita, esto tal vez se debe a que el material se mezcla con la arcilla con la que se recubre la madera (imagen 3-11) para poder fabricar el carbón vegetal.

Mauricio Arreola Sánchez

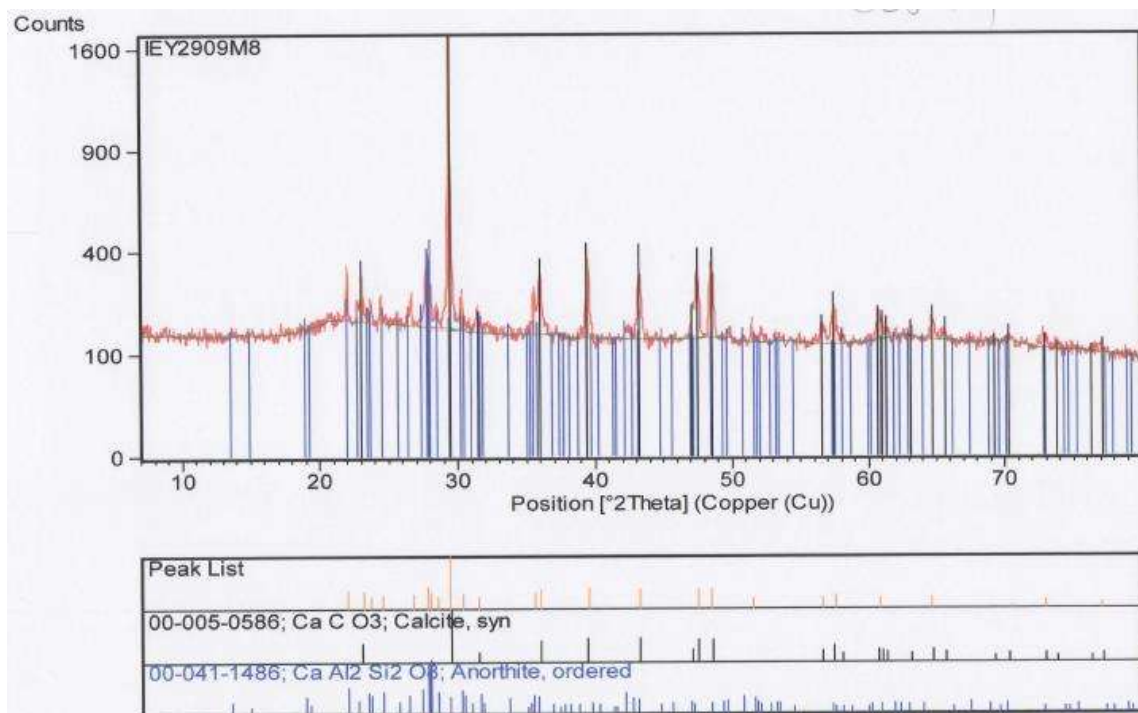


Imagen 3-12. Difractograma de la CCV.

FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La CCV presenta un 38.8% de compuestos desecados para la actividad puzolánica (tabla 3-4) y unas pérdidas por calcinación un poco altas, lo es lógico considerando el origen de dicha ceniza. Según la ASTM C 618, esta ceniza no se pueda clasificar en ninguno de los tres tipos de puzolanas.

Tabla 3-5. Composición química de la CCV.

CCV			
Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	27	SO <sub>3</sub>	0.685
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.71	ZrO <sub>2</sub>	0
TiO <sub>2</sub>	1	Cl	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.131	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
MgO	2.132	SrO	0.216
MnO	0.196	ZnO	0
CaO	25.22	PXC/PPI	19.19
Na <sub>2</sub> O	0.58	BaO	0
K <sub>2</sub> O	1.945	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0
Suma = 100.005			

Mauricio Arreola Sánchez

### FORMA DE LA PARTÍCULA

En la imagen 3-13 se observa que la CCV tiene una forma de partícula angular, muy semejante a la PN y al CM.

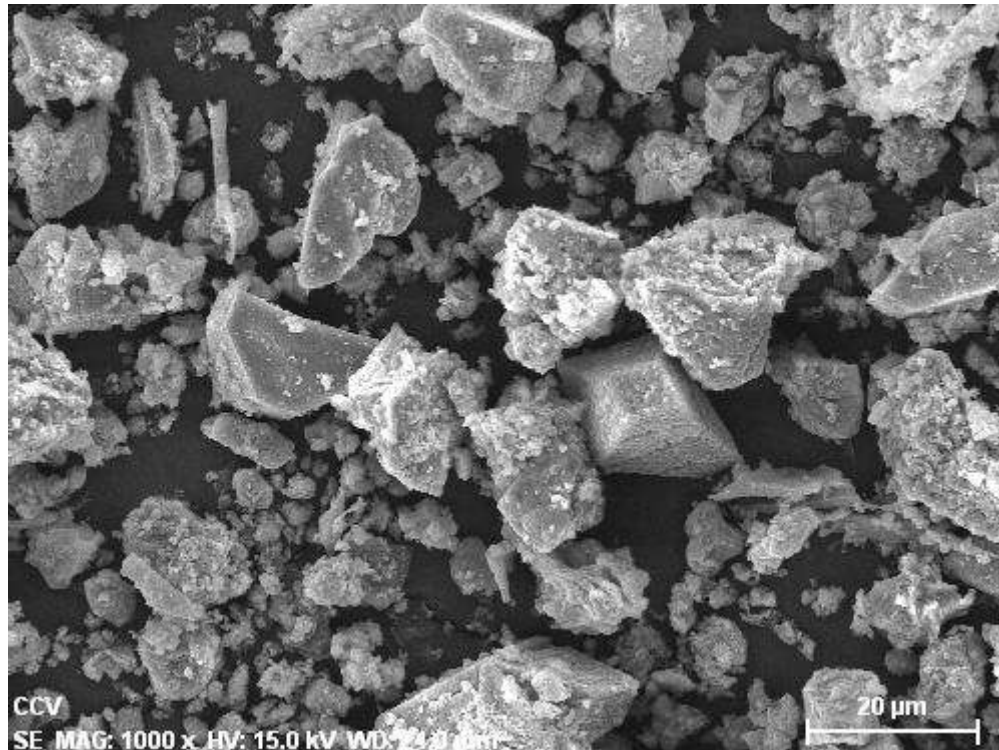


Imagen 3-13. Forma de partícula de la CCV.

### Ceniza de Elaboración de Ladrillo (CEL)

Otro proceso industrial o agroindustrial que genera cenizas, con aparente potencial puzolánico, es la elaboración y cocción de tabiques de arcilla. Durante la cocción de dichas piezas se calcina madera como fuente de calor (el tipo de madera varía según la región donde se ubiquen los productores de tabiques). En este proceso se quema no solo madera, también se llega a calcinar aserrín, cascaras de coco y residuos municipales de diferentes tipos.

La obtención de la ceniza producto de la quema de leña para la cocción del ladrillo (CEL), se obtuvo en las tabiquerías que se encuentran en comunidades aledañas a la ciudad de Morelia. La ubicación de la tabiquería se encuentra en las coordenadas 19° 38'15.01"N y 101°14'13.46", cuyo territorio corresponde a la tenencia Morelos (imagen 3-14).

*Mauricio Arreola Sánchez*



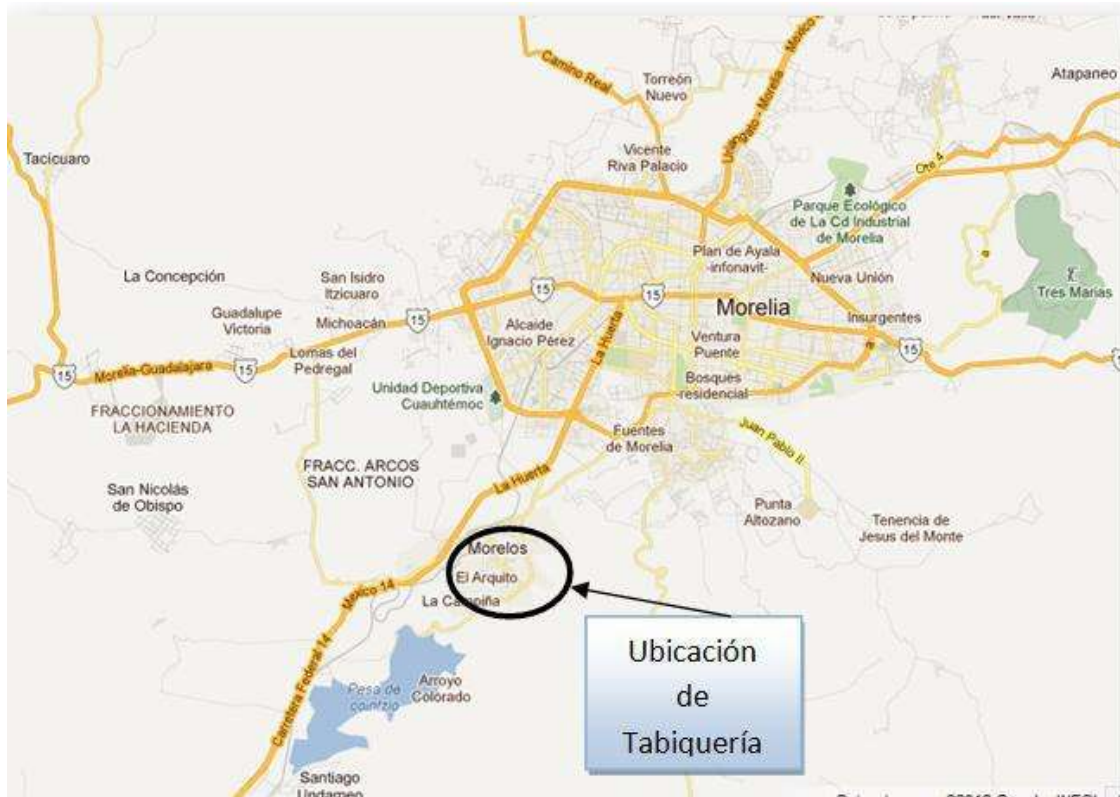


Imagen 3-14. Ubicación de tabiquerías. [94]

Esta ceniza es un producto industrial que prácticamente se desecha, exceptuando el uso que le dan los propios tabiqueros, que la pueden utilizar como desmoldante, durante la elaboración de los ladrillos. En la imagen 3-15 se muestra el horno del cual se recolecta la CEL.



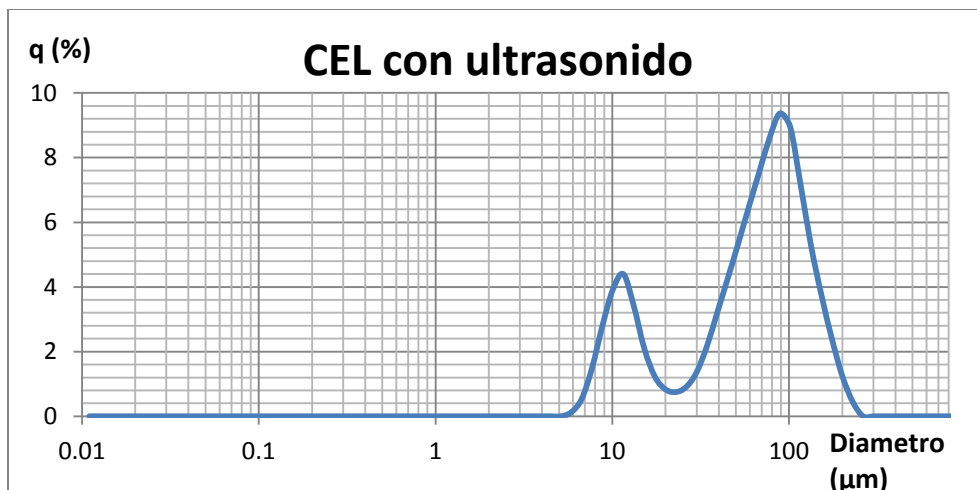
Imagen 3-15. Horno de cocción de tabiques.

*Mauricio Arreola Sánchez*

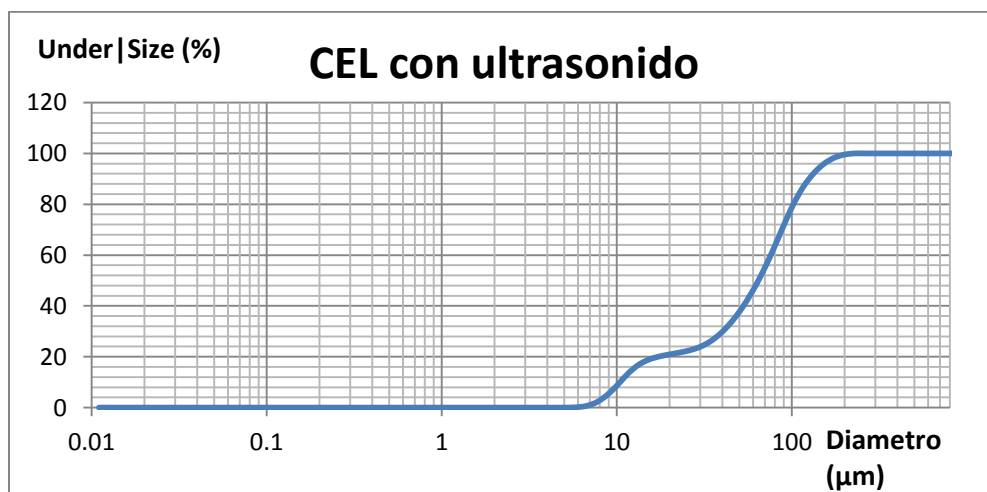
De igual manera que la CBC y CCV, la CEL fue tamizada para eliminar partículas gruesas y la mayor cantidad de carbón posible, y solo se utilizó el material que pasó la malla N°200 (80  $\mu\text{m}$ ).

**TAMAÑO DE PARTÍCULA**

La distribución y tamaños de partículas de la CEL (gráficas 3-8 y 3-9) son muy semejantes a la distribución de la CBC, solo en este caso los rangos son ligeramente diferentes, de 7-10  $\mu\text{m}$  y de 30-200  $\mu\text{m}$ . y en el caso de la CEL la distribución no es uniforme entre estos dos rangos de tamaño.



Gráfica 3-8. Tamaño de partícula de la CEL.



Gráfica 3-9. Distribución de partículas de la CEL.

Mauricio Arreola Sánchez

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La CEL también tiene una estructura cristalina completamente amorfa (imagen 3-16), lo que permite contemplarla como una ceniza con potencial reactivo.

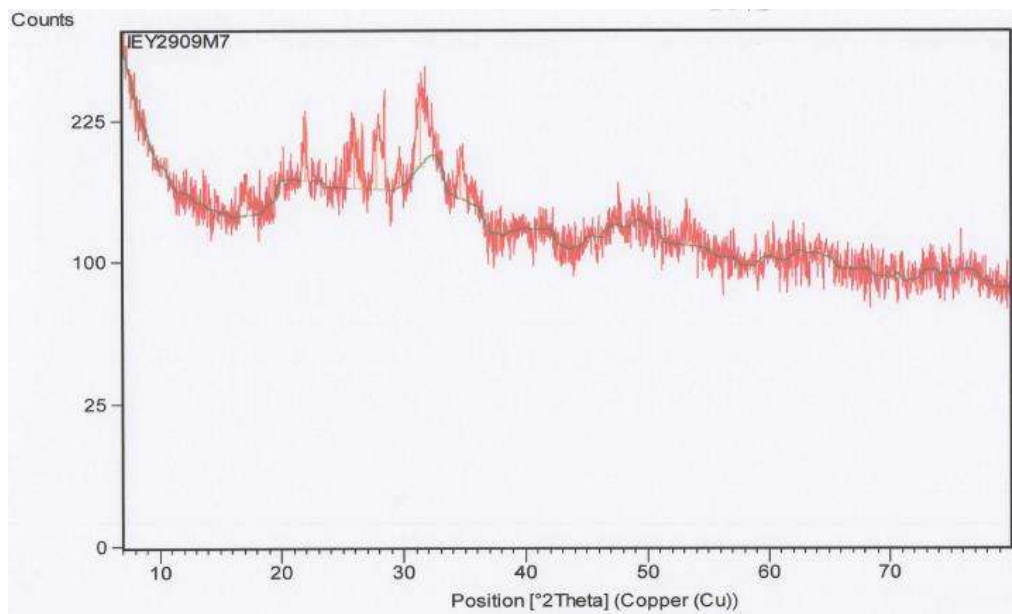


Imagen 3-16. Difractograma de la CEL.

FLUORESCENCIA DE RAYOS X

En la tabla 3-5, se muestra que la CEL tiene un 41.4% de compuestos encargados de desarrollar la actividad puzolánica, y al igual que la CCV no se le puede clasificar por ASTM.

Tabla 3-5. Composición química de la CEL.

CEL			
Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	28.18	SO <sub>3</sub>	2.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.188	ZrO <sub>2</sub>	0
TiO <sub>2</sub>	0.61	Cl	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.967	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
MgO	1.55	SrO	0.062
MnO	0.441	ZnO	0.084
CaO	29.73	PXC/PPI	12.54
Na <sub>2</sub> O	0.136	BaO	0
K <sub>2</sub> O	1.16	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10.21
Suma = 100.008			

Mauricio Arreola Sánchez



### FORMA DE LA PARTÍCULA

Las formas de las partículas de la CEL (imagen 3-17) son un poco son una mezcla entre partículas alargadas y laminadas, lo cual nos permite suponer una gran área superficial y por ende buena reactividad.

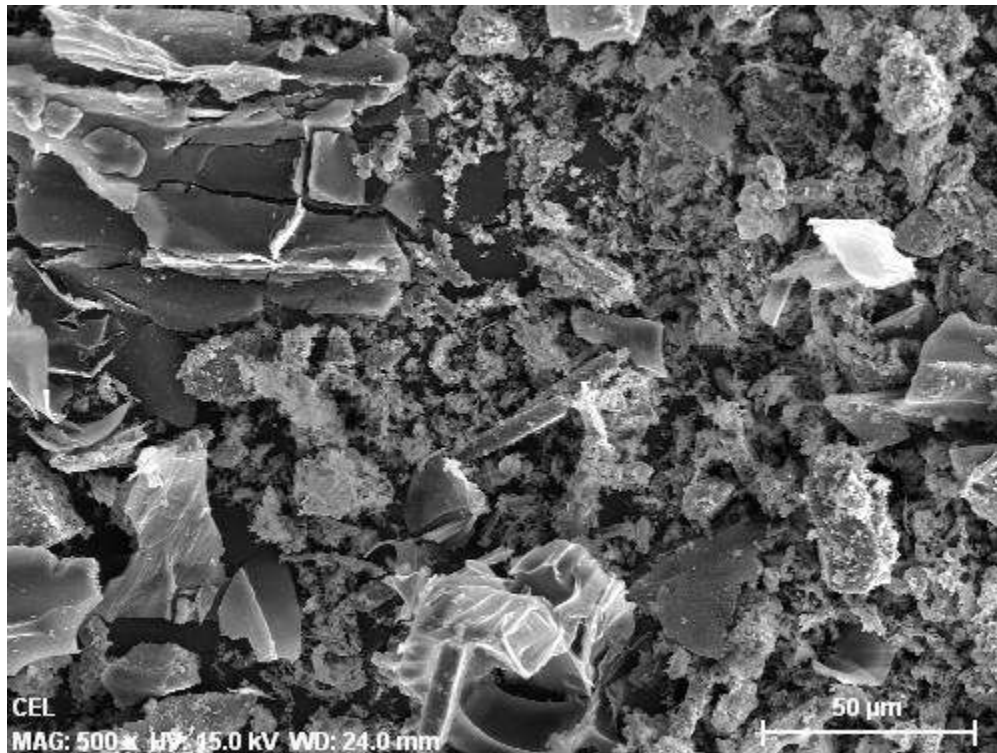


Imagen 3-17. Forma de las partículas de la CEL.

### 3.1.3 residuos industriales

En este grupo de materiales, se incluyeron aquellos que son subproductos de procesos 100% industriales, tales como los residuos de plantas cementeras, siderúrgicas, plantas geotérmicas o termoeléctricas. Para el presente trabajo solo se analizaron subproductos de procesos siderúrgicos.

#### Escoria de Alto Horno (EAH)

Es un producto formado por la neutralización de óxidos ácidos y básicos que flota en el baño de la fundición del metal y se separa del mismo para su posterior enfriamiento. Los compuestos en la escoria son: principalmente Óxidos, silicatos, hierro, caliza, magnesio y manganeso. Además de remanentes de otros elementos químicos que son agregados al horno durante el proceso de fusión y refinación del acero. Los componentes además del

*Mauricio Arreola Sánchez*

hierro en el arrabio de un alto horno empiezan a formar la escoria junto con el contenido de ceniza en la caliza y subproducto de coque, estos son separados del arrabio y recuperados.<sup>[95]</sup>

Las escorias de alto horno; y más concretamente las granuladas o peletizadas, tienen capacidad hidráulica latente o potencial; es decir, que finamente molidas y amasadas con agua son capaces de fraguar y endurecer. Esta capacidad hidráulica potencial de las escorias está muy atenuada y se manifiesta con lentitud, precisando de ciertos activadores para acelerar sus reacciones de hidratación.<sup>[96]</sup>

#### TAMAÑO DE PARTÍCULA

Al igual que el CM, la EAH que se utiliza en la experimentación es la ceniza resultante de la producción del acero de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán. La cual tiene una forma granular, esta escoria granular posteriormente fue molida hasta una finura que pasa la malla N°200 (80 µm).

#### DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Por el momento no se cuenta con el análisis de rayos de la EAH

#### FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La EAH tiene un contenido de óxidos responsables de la reacción puzolánica del 47.5%, por lo que podría clasificarse dentro de las puzolanas clase F ya que está muy cerca del 50% de óxidos que exige la ASTM C 618 para este tipo de materiales.

Tabla 3-6. Composición química de la EAH.

EAH			
Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	36.383	SO <sub>3</sub>	1.93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.631	ZrO <sub>2</sub>	0
TiO <sub>2</sub>	0.556	Cl	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.335	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
MgO	10.107	SrO	0
MnO	0.417	ZnO	0
CaO	37.551	PXC/PPI	-0.72
Na <sub>2</sub> O	0.298	BaO	0
K <sub>2</sub> O	0.424	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.053
Suma = 96.035			

Mauricio Arreola Sánchez

### FORMA DE LA PARTÍCULA

La imagen 3-18 muestra una forma de partículas angular y en algunos casos lajeada, también se puede observar que bastante variedad de tamaños, por lo que se podría inferir una buena distribución granulométrica de los mismos.

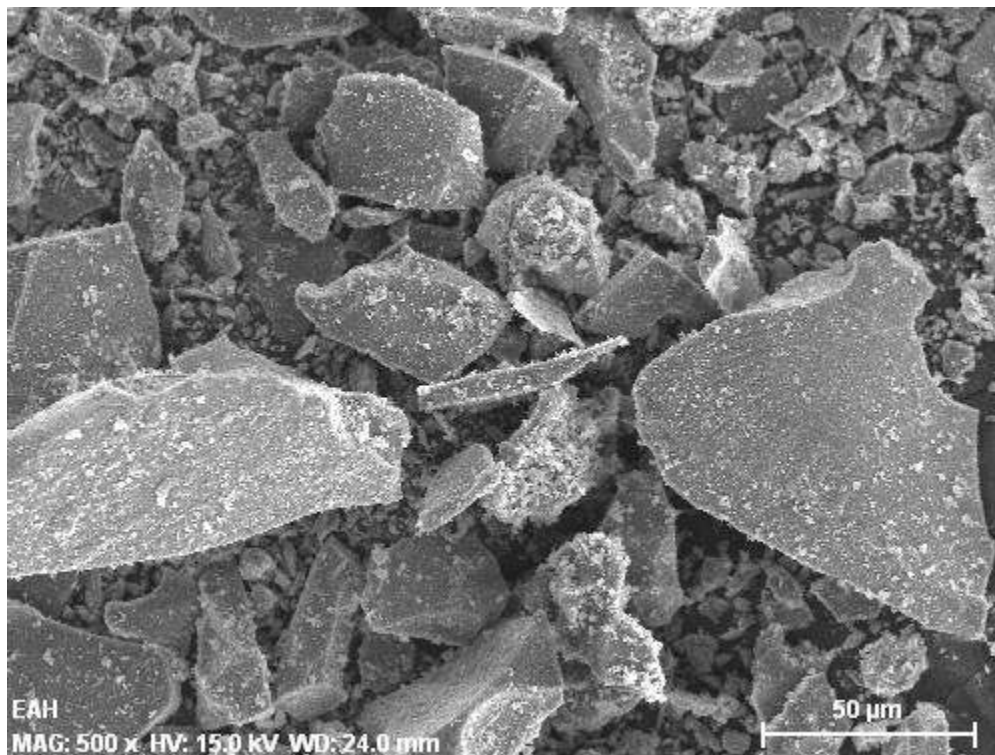


Imagen 3-18. Forma de partícula de la EAH.

### Ceniza de Horno blast oxygen furnace (CBOF)

Es un horno muy parecido al Bessemer con la gran diferencia que a este horno en lugar de inyectar aire a presión se le inyecta oxígeno a presión, con lo que se eleva mucho más la temperatura que en el Bessemer y en un tiempo muy reducido. El nombre del horno se debe a que tiene un recubrimiento de refractario de la línea básica y a la inyección del oxígeno. La carga del horno está constituida por 75% de arrabio procedente del alto horno y el resto es chatarra y cal. La temperatura de operación del horno es superior a los 1650°C y es considerado como el sistema más eficiente para la producción de acero de alta calidad.

Los óxidos de aluminio (alúmina), de silicio (sílice) y magnesio (óxido de magnesio) son los materiales refractarios más importantes. Otro óxido que se encuentran generalmente en

*Mauricio Arreola Sánchez*

materiales refractarios es el óxido de calcio (cal). Las arcillas refractarias también se utilizan ampliamente en la fabricación de materiales refractarios, como puedes ser la chamota.<sup>[97]</sup>

Se podría decir que el subproducto que genera este horno es una clase de escoria.

#### TAMAÑO DE PARTÍCULA

Al igual que el CM y la EAH, el material o ceniza CBOF que se utilizó en la experimentación es la ceniza resultante de unos de los procesos dentro de la producción del acero de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán. La cual tiene una forma granular, solo que este material no fue molido, solo tamizado hasta una finura que pasa la malla N°200 (80  $\mu\text{m}$ ).

#### DIFRACCIÓN DE RAYOS X

**Por el momento no se cuenta con el análisis de rayos del CBOF.**

#### FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La cantidad de compuestos puzolánicos en el CBOF (tabla 3-7) son del 45.7%, por lo que no se le puede clasificar como un material puzolánico según la ASTM C 618.

Tabla 3-7. Composición química de CBOF.

CBOF			
Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	14.584	CaO	37.456
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.287	Na <sub>2</sub> O	0.032
TiO <sub>2</sub>	0.827	K <sub>2</sub> O	0.024
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.773	PXC/PPI	4.79
MgO	5.995	SO <sub>3</sub>	0.8
MnO	2.423	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.814
Suma = 98.005			

#### FORMA DE LA PARTÍCULA

Al parecer las partículas que conforman el material refractario CBOF (imagen 3-19) no tienen forma ni angulosa ni redondeada, son más bien grumos o aglomeraciones de partículas más pequeñas; lo cual se puede corroborar en la imagen 3-20, donde ya se aprecia una forma laminar.

*Mauricio Arreola Sánchez*



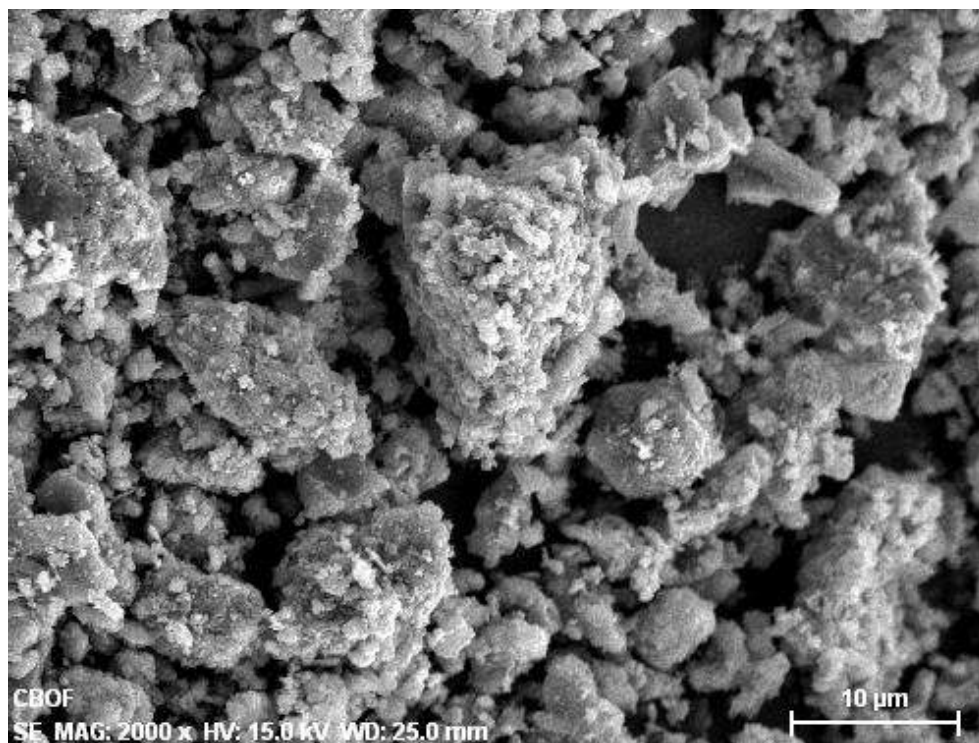


Imagen 3-19. Forma de partículas del CBOF.

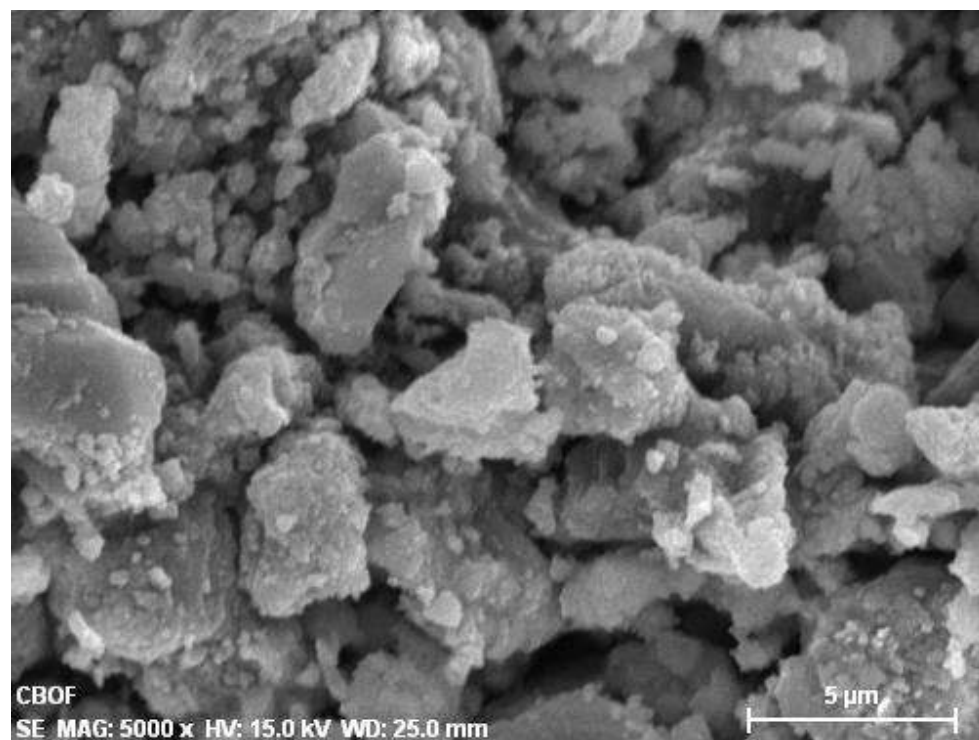


Imagen 3-20. Detalle de partículas del CBOF.

*Mauricio Arreola Sánchez*

### 3.1.4 Fibras orgánicas

Dentro de este grupo se consideró a los materiales que son de origen orgánico o sintético que no sufrieron ningún cambio térmico antes de ser considerados como materiales con potencial puzolánico.

#### **Fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco (FN)**

El nopal pertenece al género *Opuntia*, del grupo cacti, que contiene cerca de 300 variedades (algunos con espinas otros sin ellas) un tipo común del cactus espinoso también conocido como higo indio. <sup>[98]</sup>

Una característica importante del nopal es su alto contenido de carbohidratos (glucosa), que agrupados en grandes cadenas forman el almidón, considerado también como aditivo en la elaboración de morteros, para retener agua de amasado y favorecer el fraguado. <sup>[99, 100]</sup>

A partir del jugo de nopal, se puede fabricar pintura que actúa como impermeabilizante, el cual puede ser aplicado a cualquier construcción para protegerla. En caso de aplicarse a una vivienda, este impermeabilizante hecho a base de nopal, protege la construcción del frío, la humedad del ambiente, del agua y de los insectos. El mortero de cal adicionado con baba de nopal se utiliza también para restaurar y proteger edificios históricos debido a su funcionamiento mejorado contra la penetración del agua y agrietamientos. <sup>[101]</sup> En pastas de cemento disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia a la compresión. <sup>[98]</sup>

De acuerdo a la publicación técnica #328 de la SCT y del IMT, resultados preliminares sugieren que agregar nopal o aloe vera deshidratados en pequeñas concentraciones ( $\leq 2\%$  en peso, como reemplazo del cemento) puede ser conveniente para incrementar la resistencia a la corrosión en elementos de concreto reforzado.

#### *TAMAÑO DE PARTÍCULA*

A este material no se le realizó ninguna prueba para determinar su tamaño o distribución de partículas, se empleó tal cual es proporcionado por el fabricante (Productos CU-CU).

#### *DIFRACCIÓN DE RAYOS X*

Dado que este material es completamente orgánico, no se realizó su caracterización de fases mineralógicas.

*Mauricio Arreola Sánchez*

### FLUORESCENCIA DE RAYOS X

No fue posible hacer el análisis de la composición química de la FN ya que las pérdidas por calcinación de la misma fueron del 88%.

### FORMA DE LA PARTÍCULA

La forma de las partículas de la FN es muy arecida a la CBC y CEL ya que los tres materiales son de origen vegetal, es por esto que presentan fibras de formas alargadas.

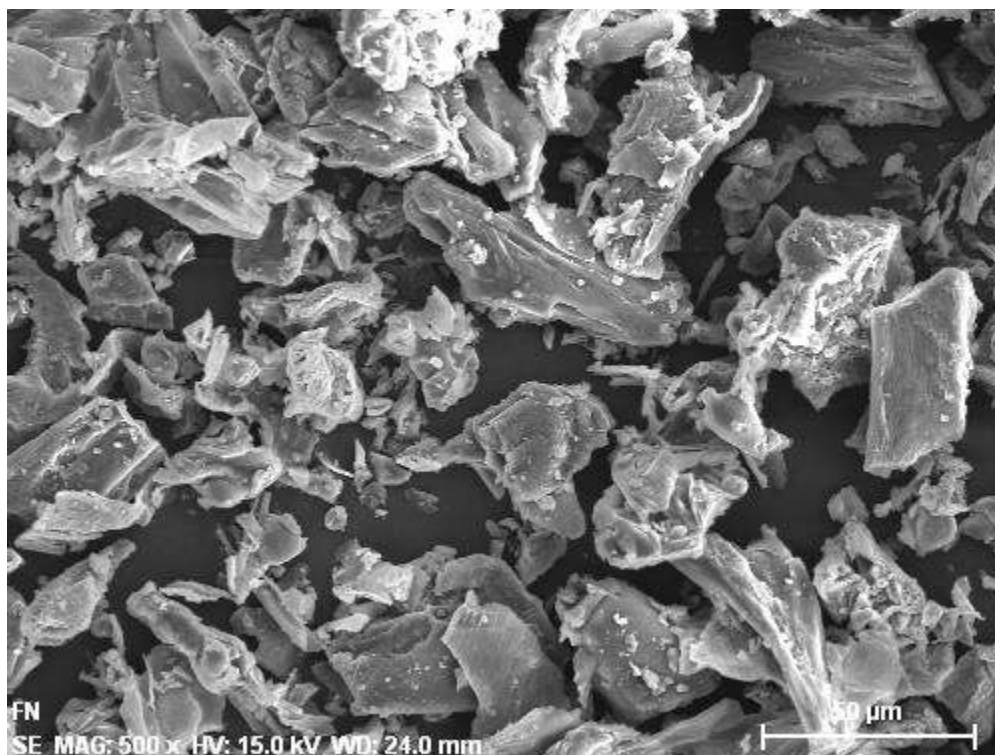


Imagen 3-21. Forma de partícula de la FN.

### 3.1.5 Cemento portland CPC

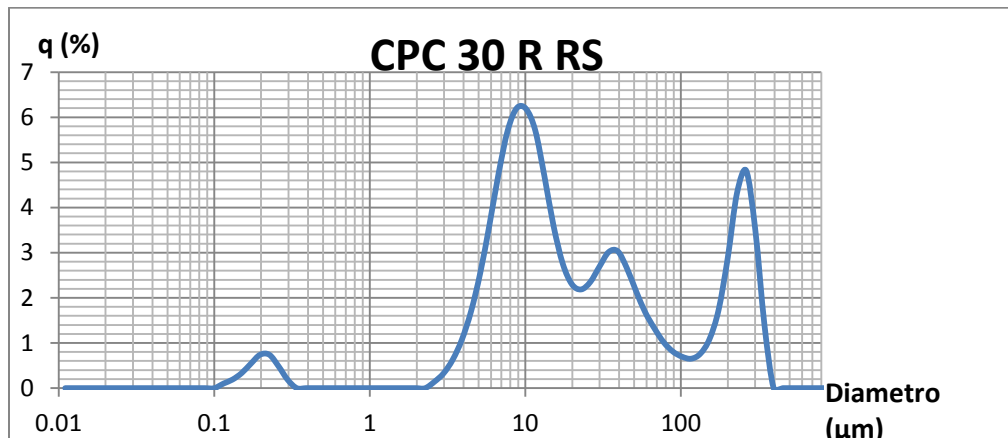
El cemento que se utiliza en esta investigación es Tolteca CPC 30R RS. Esto significa que es un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 3 días de 20 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE, 2004).

El cemento se caracterizó por difracción de rayos X, para determinar cualitativamente las fases presentes y por Fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer la composición química.

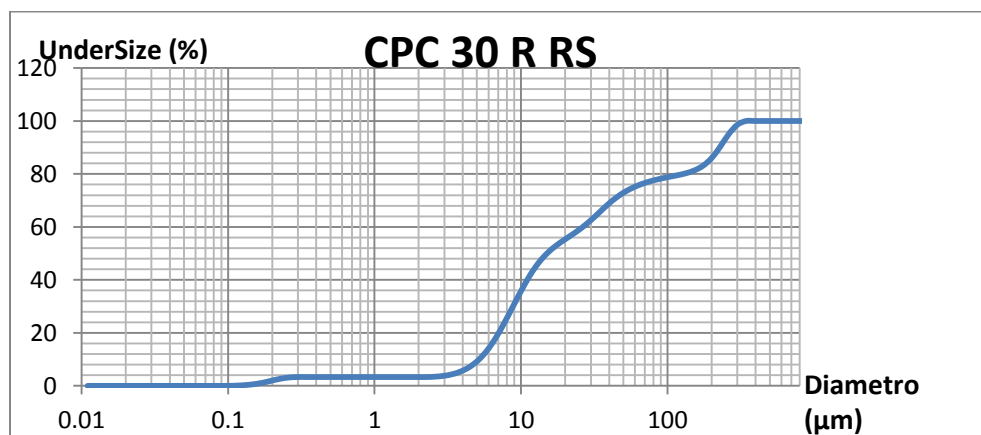
*Mauricio Arreola Sánchez*

TAMAÑO DE PARTÍCULA

El cemento CPC utilizado en la investigación presenta una mayor variedad de tamaños (grafica 3-10) que las cenizas y materiales sustitutos empleados, y además muestra una distribución uniforme desde los 3 hasta los 300 $\mu$ m (grafica 3-11).



Grafica 3-10. Tamaño de partícula del cemento CPC.



Grafica 3-11. Distribución de partículas del Cemento CPC.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En el análisis por difracción de rayos X (imagen 3-22) se encontraron las fases típicas de los cementos portland.

Mauricio Arreola Sánchez



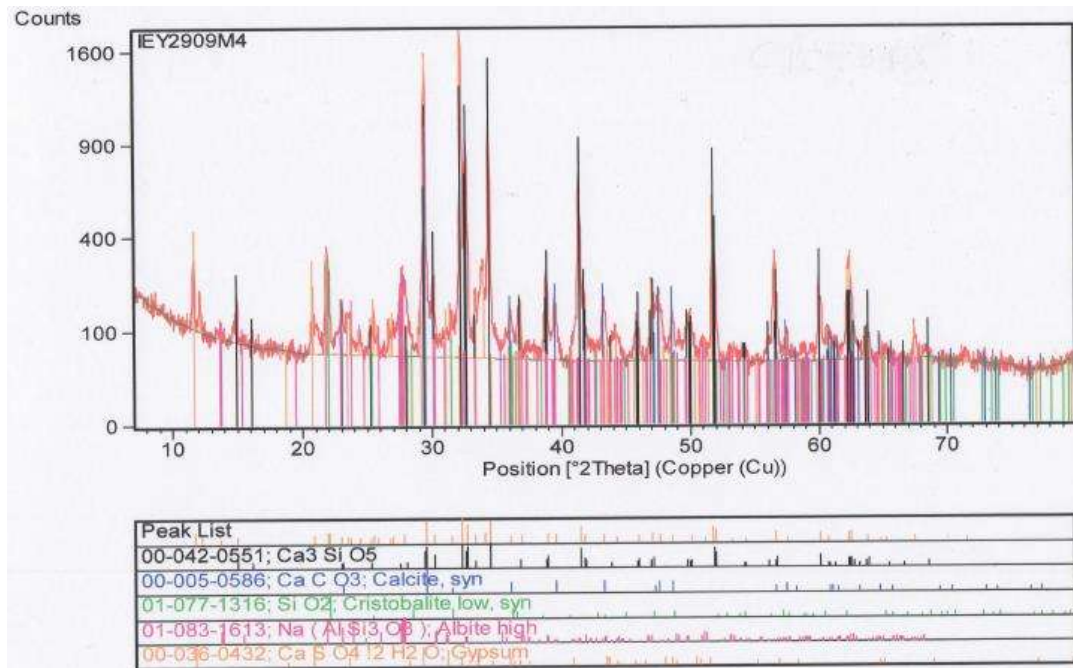


Imagen 3-22. Difractograma del cemento CPC.

### FLUORESCENCIA DE RAYOS X

En la tabla 3-8 se presenta la composición química del cemento portland usa en la investigación.

Tabla 3-8. Composición química del cemento CPC.

CPC 30R RS			
Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	23.88	SO <sub>3</sub>	3.791
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.997	ZrO <sub>2</sub>	0
TiO <sub>2</sub>	0.217	Cl	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.972	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
MgO	0.88	SrO	0.061
MnO	0.096	ZnO	0.076
CaO	54.6	PXC/PPI	5.54
Na <sub>2</sub> O	1.23	BaO	0
K <sub>2</sub> O	1.666	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0
Suma = 100.006			

Mauricio Arreola Sánchez

### FORMA DE LA PARTÍCULA

Como se puede observar en la imagen 3-23, la forma de las partículas del cemento CPC es muy similar al de los materiales y cenizas muestreadas que tienen un origen mineral, solo que en el caso del CPC se observa una mayor variedad de tamaños.

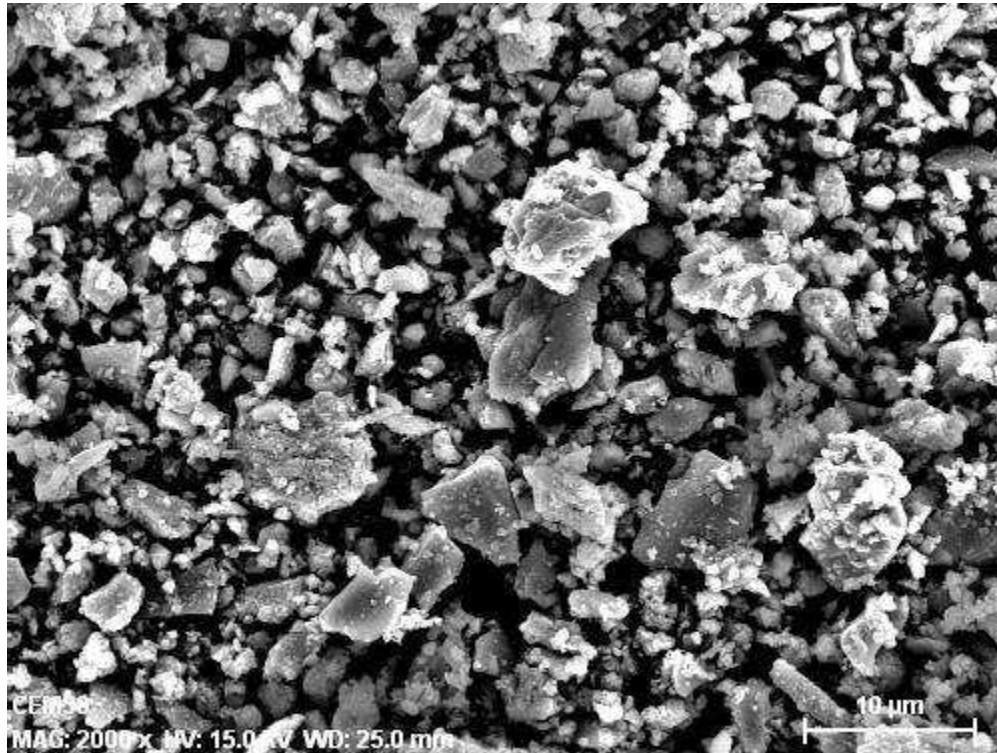


Imagen 3-23. Forma de partículas del cemento CPC.

### 3.1.6 Áridos inertes (arena) empleados.

Los agregados son los componentes importantes en el concreto. Ellos dan cuerpo al concreto, reducen pérdidas y afectan la economía. Anteriormente, los agregados fueron considerados como materiales químicamente inertes, pero ahora se ha reconocido que algunos de los agregados son químicamente activos y ciertos agregados muestran enlaces químicos agregados en la interfaz del agregado y la pasta de cemento. [102]

Para el presente trabajo se emplearon dos tipos diferentes de áridos, ambos son materiales de río con un alto contenido de cuarzo y fueron cribados por las mallas N°16 y N°30 siendo utilizado solo el material de entre ambas mallas, esto con la finalidad de que cumpla con características similares a las que se especifica en la norma ASTM C 91, 1995, arena de Ottawa, que nos indica que debe de tener alto contenido de sílice.

*Mauricio Arreola Sánchez*

En las sustituciones parciales con CM, EAH, CBOF y FN; se utilizó arena del río Lerma, entre los estados de Michoacán y Guanajuato.

### **Arena del río Huajúbaro**

La arena utilizada para la elaboración del mortero con sustituciones parciales de MK, PN, PE, CCV, CVC y CEL fue del río Huajúbaro proveniente del banco llamado “ojo del cuervo” en el poblado del “El Cuervo” ubicado en el municipio de Zinápecuaro, Michoacán.

#### *FLUORESCENCIA DE RAYOS X*

En la tabla 3-9 se comprueba el alto contenido de cuarzo de la arena, ya que el contenido de sílice es superior al 78% y dado que es un material de origen volcánico se puede inferir que el sílice está presente en forma cristalina.

**Tabla 3-9. Composición química del Arena H.**

<b>Arena Huajúbaro</b>			
<b>Componente</b>	<b>%</b>	<b>Componente</b>	<b>%</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	78.185	<b>CaO</b>	1.015
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	11.557	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2.666
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.203	<b>K<sub>2</sub>O</b>	3.577
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1.567	<b>PXC/PPI</b>	1.19
<b>MgO</b>	0.239	<b>BaO</b>	0
<b>MnO</b>	0.03	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.036
<b>Suma = 100.29</b>			

#### *FORMA DE LA PARTÍCULA*

Como se puede apreciar en la imagen 3-24, las partículas de la arena son fragmentos de roca redondeados por el arrastre del río.

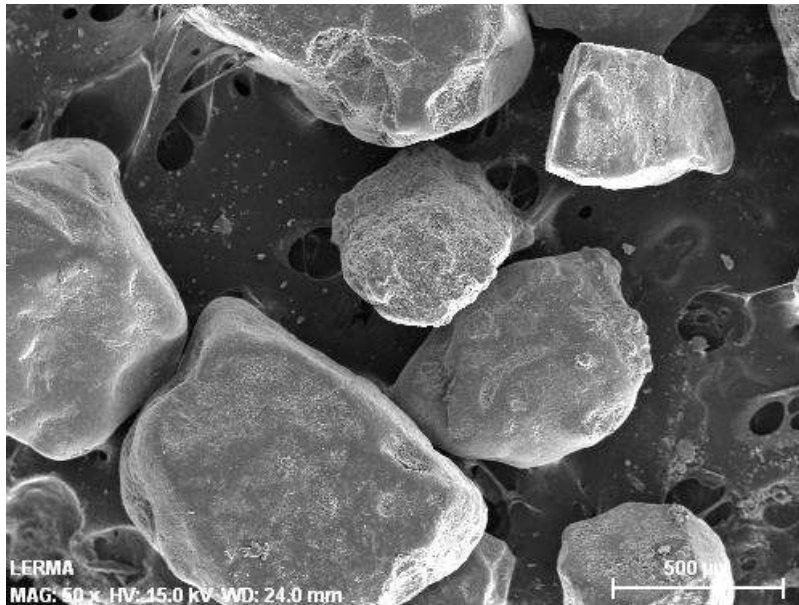


Imagen 3-24. Forma de partículas de arena H.

#### Arena del río Lerma.

En las sustituciones parciales con CM, EAH, CBOF y FN; se utilizó arena del río Lerma, entre los estados de Michoacán y Guanajuato.

#### FORMA DE LA PARTÍCULA

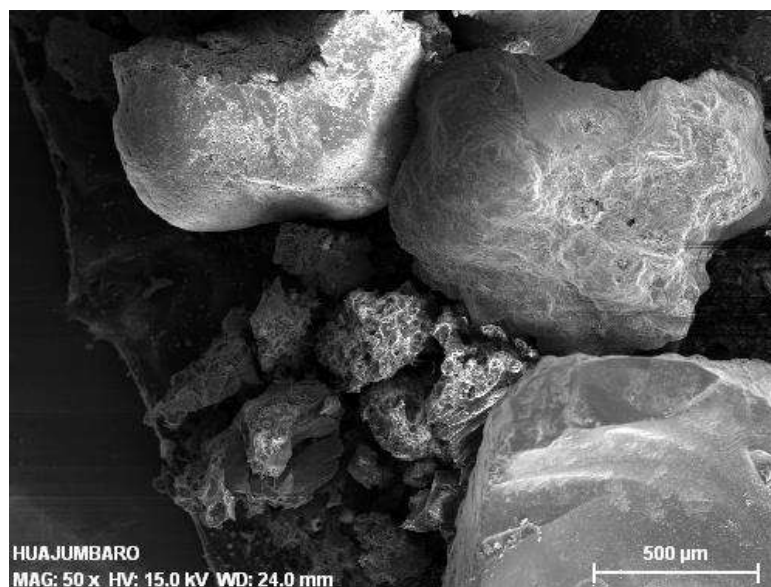


Imagen 4. Forma de partículas de arena río Lerma.

*Mauricio Arreola Sánchez*

De igual manera en que el arena del rio Huajúmbaro, la arena del rio Lerma presenta partículas redondeadas las cuales son fragmentos de rocas, solo que para este caso se presentan un poco más variedad de tamaños.

Ambos materiales inertes serán caracterizados según los requerimientos de normas para su uso en morteros y concretos en el capítulo de resultados.

### **3.2 Equipo de caracterización utilizado**

Para el caso de las pruebas de las pruebas de tamaño de partícula y distribución, las muestras fueron analizadas por el Dr. José Iván Escalante García, quien es Profesor Investigador Titular en el Cinvestav Unidad Saltillo. Para dicho análisis se empleó (datos de equipo y técnica pendientes).

De igual manera el Dr. José Iván Escalante García, realizo el análisis de Difracción de rayos X y de fluorescencia de rayos X para los siguientes materiales: CBC, CCV, CEL, MK y para el cemento CPC 30R RS. Para la prueba de fluorescencia de rayos X se implementó la siguiente metodología de análisis:

Las muestras fueron analizadas por método Semicuantitativo en Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX) con dispersión de longitud de onda, para lo cual se utilizó un equipo Marca BRUKER Modelo S4 PIONNER, el cual está provisto de una fuente de excitación de 4kW, la interpretación de los datos se realizó utilizando el software SPECTRA plus. Se realizó un barrido al vacío de 71 elementos (Na-U), con un %RSD aproximado para concentraciones >1% de 5 a 10 y para concentraciones <1% de 10 a 20 bajo las siguientes condiciones:

- Tubo de RX con ánodo de Rh
- Voltaje de excitación de 25 a 60 kv.
- Colimador de 0.46dg
- Máscara de colimador de 34mm
- Cristales LIF200 (lithium fluoride) y PET (pentaerithrit)

Los compuestos aquí reportados se calcularon por Estequiometria basándose en los elementos determinados por FRX.

Y para la prueba de difracción de rayos X la metodóloga fue (datos de equipo y técnica pendientes). Por último, para determinar la forma de partícula se utilizó la técnica de SEM en el instituto de investigaciones metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El equipo empleado fue (datos de equipo y técnica pendientes)

*Mauricio Arreola Sánchez*



## CAPÍTULO 4. DISEÑO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS A REALIZAR

### 4.1 Diseño de mezclas

Como ya se explicó en el capítulo uno, la intención de esta investigación es determinar si los diferentes materiales muestreados influyen mejoras al mortero y/o concreto de cemento portland, lo anterior mediante la sustitución parcial del cemento de la mezcla por los diferentes materiales con potencial puzolánico.

La norma ASTM C 311-00, especifica el procedimiento para determinar si un sustituto del cemento portland presenta actividad puzolánica o no, a tal característica se le nombra Índice de Actividad Puzolánica (IAP) o Índice de Actividad Resistente (IAR).

La experimentación se puede dividir en dos etapas, la primera fue para determinar qué porcentajes de sustitución de cada material mostraban mejores comportamientos mecánicos; y la segunda etapa para realizar toda la caracterización de propiedades que mecánicas (compresión, flexión y tensión) y físicas (porosidad, densidad, durabilidad) mejoraba cada material de estudio.

#### 4.1.1 Etapa preliminar

Una vez caracterizados, tanto los materiales sustitutos, el cemento y agregados, y previo a las prueba de compresión se analizaron las sustituciones solo en la pasta de cemento-agua, con el fin de determinar la consistencia normal y los tiempos de fraguado de los diferentes materiales sustitutos. Los porcentajes de sustitución fueron de 5, 10, 15, 20 y 30% (para todas las cenizas y puzolanas) y para la fibra de nopal FN los porcentajes fueron 0.5, 1, 1.5, 2 y 4% con respecto al peso del cemento.

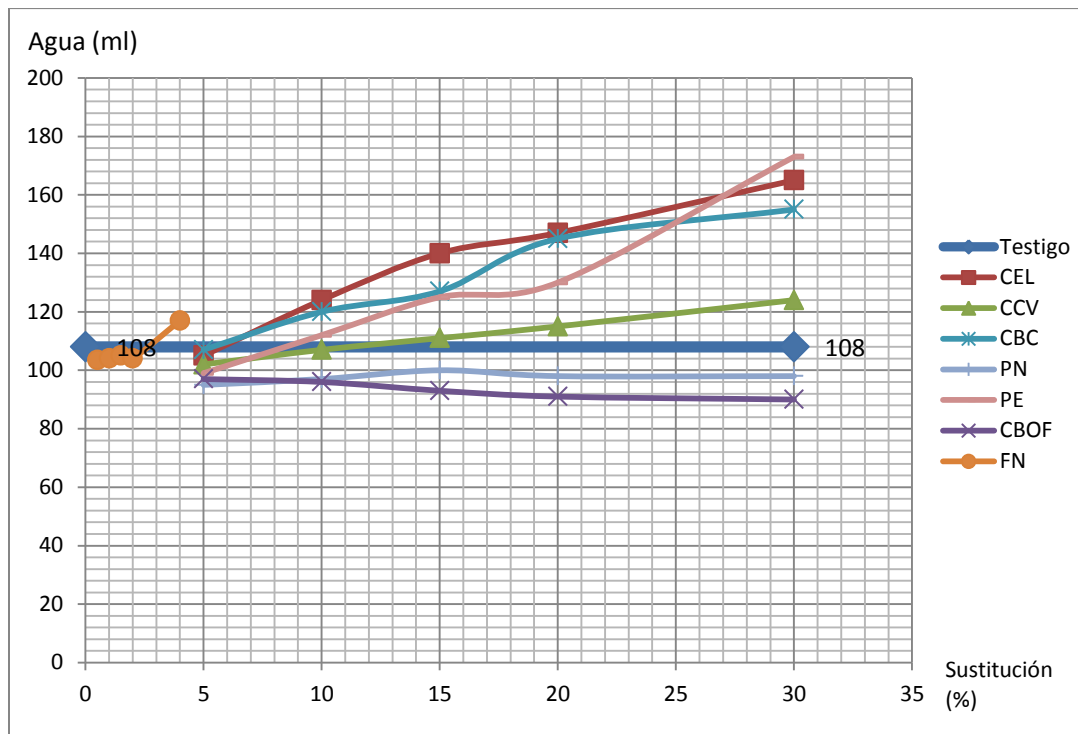
#### Consistencia normal

La consistencia y trabajabilidad en el concreto es una medida de que tan fácil resulta manejar, colocar y compactar la pasta de cemento. La consistencia es la capacidad que tiene el concreto para fluir, sin que se presente segregación en la mezcla ni sangrado excesivo. Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico. NMX-C-057-1997-ONNCCE. ASTM-C-187-98.

En la gráfica 4-1, se aprecia como las cenizas o materiales que presentaron evidencias de una mayor área superficial durante su caracterización (capítulo 3), son las que demandan

*Mauricio Arreola Sánchez*

más agua para lograr la consistencia que exigen las normas vigentes, a excepción de la FN que muestra una demanda de agua ligeramente menor a la pasta testigo para los porcentajes menores al 4%.

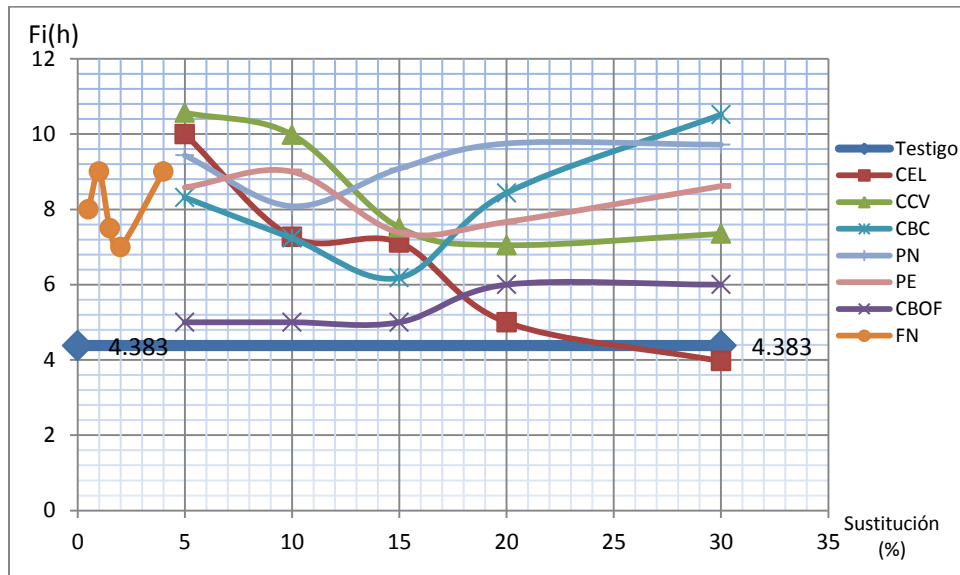


Grafica 4-1. Consistencia Normal de pastas cemento-sustituto.

### Fraguado inicial

Es el tiempo que transcurre desde que la pasta plástica, que se forma cuando el cemento se mezcla con agua, va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.

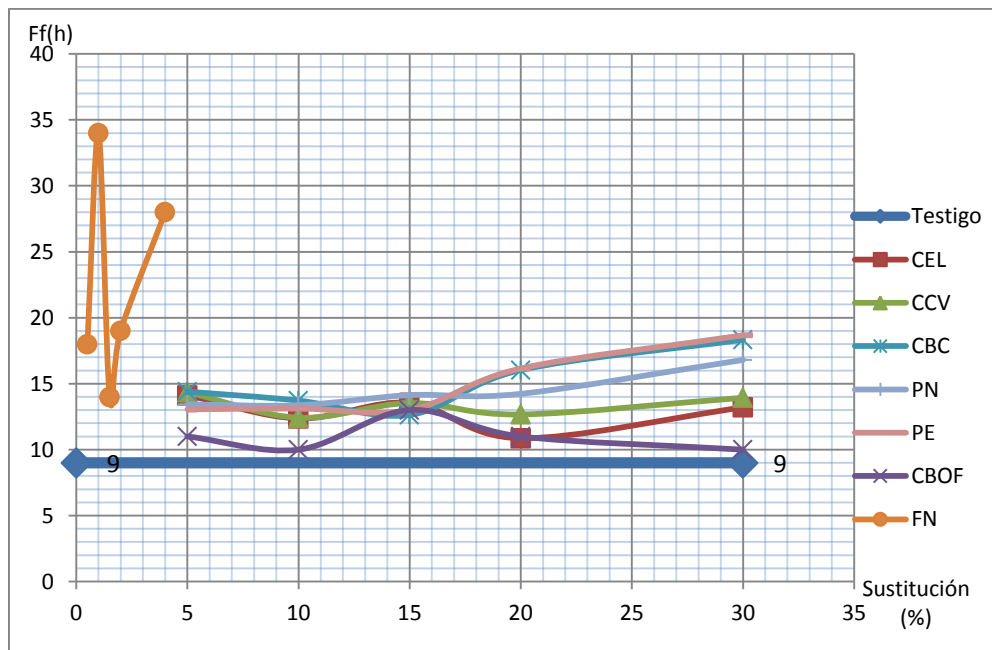
Como se puede observar en la gráfica 4-2, los tiempos de fraguado inicial se incrementan en un rango de 2 a 6 horas más que la pasta testigo (cemento-agua), presentándose mucha variabilidad tanto entre materiales sustitutos como entre los porcentajes de sustitución.



Grafica 4-2. Tiempo de fraguado inicial de pastas C-A.

### Fraguado final

Es el tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya esta dura.



Grafica 4-3. Fraguado final de pastas.

Mauricio Arreola Sánchez



Los tiempos de fraguado final (gráfica 4-3) se incrementan en todos los materiales y porcentajes analizadas en un rango de 1 a 6 horas. Salvo el comportamiento de la FN, la variabilidad entre los materiales y los porcentajes de sustitución es mucho menor que para el fraguado inicial.

La prueba de tiempos de fraguado fue realizada mediante el método de Gillmore, según la norma ASTM C 266-03.

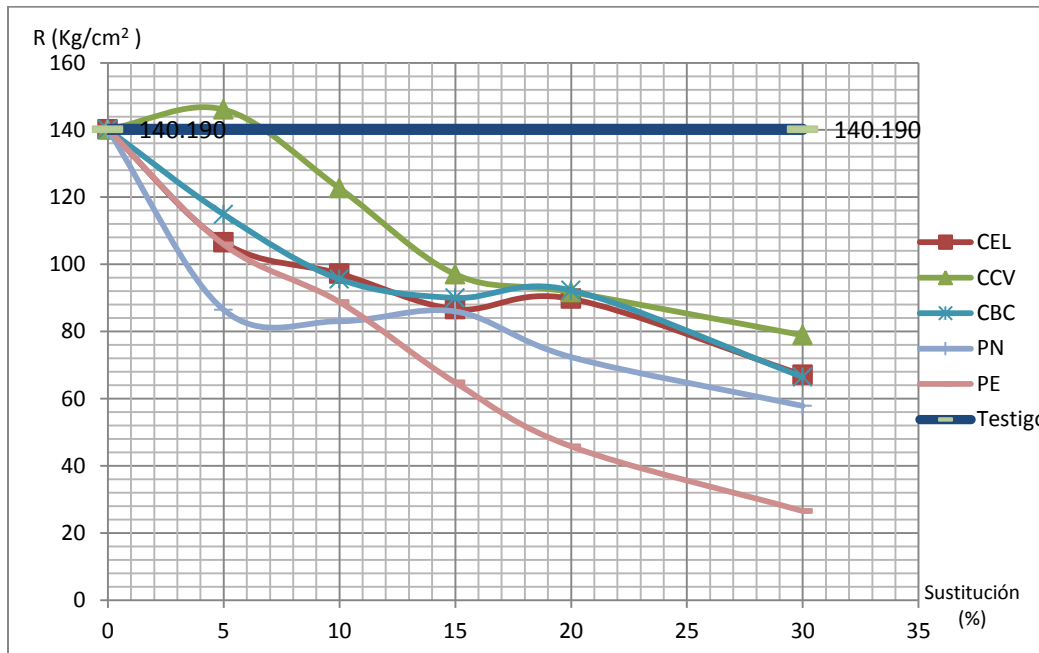
#### **Resistencia a 28 días de los primeros 5 materiales muestreados.**

Con la intención de poder prever cuales porcentajes de sustitución tenían buenos comportamientos, y así poder filtrar aquellos porcentajes que no tendrían un buen desempeño en la segunda etapa de la experimentación, se elaboraron seis cubos de 5cm por lado para ser probados a 28 días de edad (edad en la que el CPC ya ha desarrollado el 100% de su resistencia). Dado que el cemento usado en la investigación es un CPC 30R RS, lo que significa que tendría que alcanzar cerca del 100% de su resistencia de proyecto; entonces se esperaba que a los 28 días ya se pudieran notar indicios de actividad puzolánica que nos permitiera filtrar los porcentajes con mejor desempeño.

Para la elaboración de los especímenes se utilizó la arena de Huajúbaro con el tratamiento previo descrito en el capítulo 3. Inicialmente se intentó seguir el procedimiento descrito por la norma ASTM C311-04, la específica que para el diseño de mezclas los especímenes control (testigo), se elaboran con 2.75 partes de arena por una de cemento y una relación agua/cementantes de 0.485, la cual se modifica hasta alcanzar una fluidez de  $110 \pm 5\%$  para el caso de las mezclas con los materiales sustitutos a estudiar; de igual manera, la norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2001 también especifica que para determinación de la resistencia a compresión de cementantes hidráulicos se deben elaborar especímenes con una relación a/c de 0.485 pero solo para cementos CPO, mientras que para cementos diferentes al CPO se debe suministrar el agua necesaria para lograr la misma fluidez de la norma ASTM C311-04.

Lo anterior implicó un conflicto al momento de intentar elaborar los especímenes con la relación a/c de 0.485, ya que la mezcla era muy poco trabajable y muy difícil de colocar en los moldes, resultando un mortero de mala calidad por lo poco trabajable de la mezcla. Por tal motivo se procedió a aplicar lo dictaminado por la norma NMX-C-061-ONNCCE-2001 y se realizaron las diferentes sustituciones de cemento, agregando agua a las mezclas hasta logra la fluidez de  $110 \pm 5\%$ . Los resultados de resistencia se muestran en la siguiente gráfica 4-4.

*Mauricio Arreola Sánchez*



Grafica 4-4. Esfuerzo a 28 días de 5 de los materiales sustitutos.

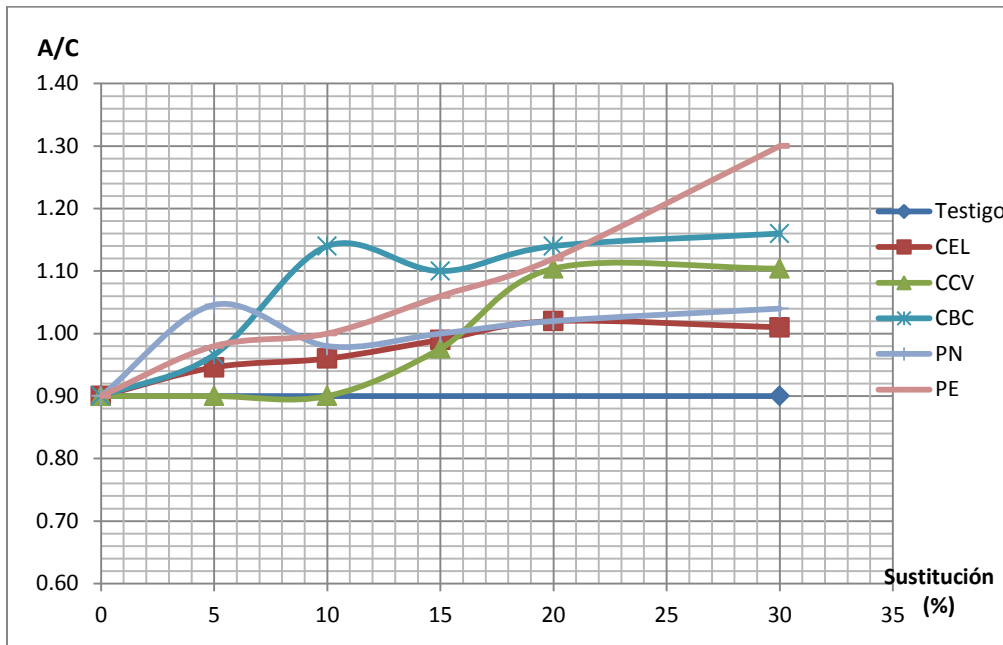
El esfuerzo a compresión resultante fue en general menor al testigo, excepto el 5% de CCV, observándose una clara pérdida de resistencia del mortero a medida que incrementa la sustitución del cemento (grafica 4-4); esto se debe principalmente a que la relación a/c de las mezclas varió en función de la demanda de agua de los materiales sustitutos.

Los materiales de estudio presentaron demandas de agua diferentes (grafica 4-1) la cual depende, entre otras cosas, de la forma y tamaño de partícula, ya que la demanda de agua se incrementa al incrementarse el área superficial a cubrir en la pasta o mezcla.

Dado que la relación a/c es diferente (grafica 4-5), no solo en entre los materiales sino que también entre los porcentajes de sustitución de cada material, los resultados de compresión no son concluyentes; y no es posible determinar cuál de las sustituciones muestra evidencias de actividad puzolánica. Por tal motivo se decidió analizar los 5 porcentajes de sustitución a los diez materiales de estudio en la etapa dos, pero manteniendo fija la relación agua/cementante en todas las mezclas.

Como es evidente que al mantener fija la relación a/c las mezclas con mayor demanda de agua que la mezcla testigo (grafica 4-1) no cumplirán con la fluidez especificada por las normas, es necesario el uso de un aditivo fluidificante, para así garantizar que todas las mezclas sean trabajables dentro de las especificaciones de la normatividad.

Mauricio Arreola Sánchez

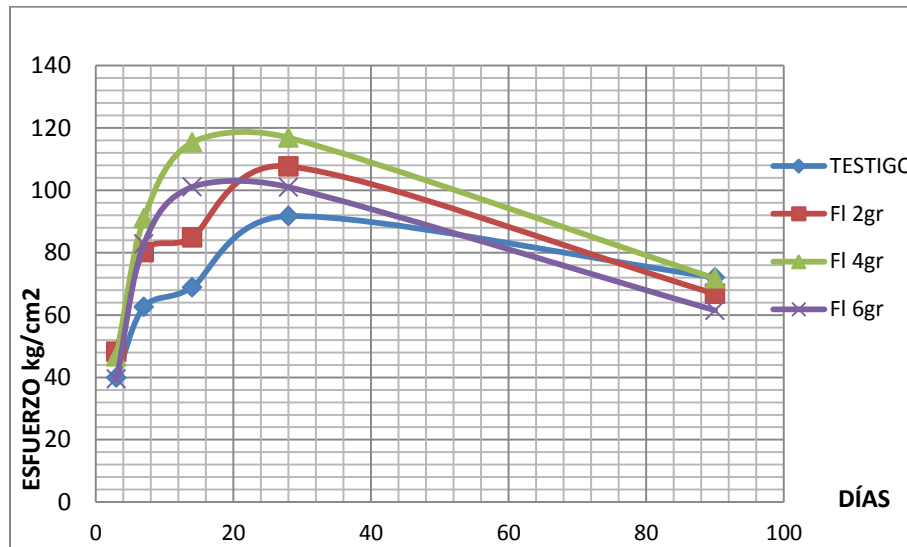


Grafica 4-5. Relación agua/cementante de 5 de los materiales sustitutos.

### Efecto del fluidificante empleado

Cuando la relación a/c, no cumple con la fluidez de  $110 \pm 5$  fue necesario agregar un aditivo fluidificante. El cual cumple con las siguientes características: el nombre comercial es SikaCem Fluidificante (en polvo), aditivo fluidificante de concretos o morteros que incrementa el revenimiento o disminuye el consumo de agua en un 10% aprox. El fabricante recomienda la siguiente dosificación: Una bolsa de 200g de producto (SikaCem Fluidificante) por cada saco de 50 kg, es decir 4g x Kilo de cemento.

Para conocer el efecto del fluidificante en la resistencia de los morteros, se realizaron cubos de 5cm por lado, mismos que fueron probados a varias edades hasta el límite de 90 días (grafica 4-6). Los resultados muestran un fuerte incremento de la resistencias en las edades tempranas de las mezclas con fluidificante, pero a medida que se incrementa la edad de los especímenes dicho de incremento es menor y se va perdiendo con una tendencia constante hasta llegar a los 90 días; edad en la que el efecto es prácticamente nulo. Lo cual es bastante favorable a la investigación, ya que según la literatura, es alrededor de los 90 días que la actividad puzolánica es evidente.



Grafica 4-6. Efecto del fluidificante en la resistencia del mortero.

### Diseño de mezclas definitivo

Con base en los resultados obtenidos en esta etapa preliminar se determinó el diseño de mezclas a realizar para la experimentación definitiva (segunda etapa), dicho diseño se muestra en la tabla 4-1. La relación agua/cementante se fijó en 1.01 (que fue la necesaria para que la mezcla testigo cumpliera con la fluidez) y el fluidificante se usó solo en aquellas mezclas que no cumplieran con la trabajabilidad. Las diferentes pruebas a realizar en la experimentación se detallan en el siguiente subcapítulo.

Tabla 4-1. Diseño de mezclas a analizar.

Parámetro	Sustituciones para CBC, CCV, CEL, PE, PN, CBOF, CM, EAH y MK					
	0%	5%	10%	15%	20%	30%
Cemento CPC	100	95	90	85	80	70
M. Sustituto	0	5	10	15	20	30
R. agua/cementante	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
R. arena/cementante	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75

Parámetro	Sustituciones para FN					
	0%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	4.0%
Cemento CPC	100	95	90	85	80	70
M. Sustituto	0	5	10	15	20	30
R. agua/cementante	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
R. arena/cementante	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75

#### 4.1.2 Elaboración de las mezclas

Una vez determinado el diseño de mezclas, se procedió a la elaboración de las mismas. Como ya se indicó, la relación agua/cementante fue de 1.01; la determinación de dicha relación se logró al realizar la mezcla testigo (solo cemento portland, agua y arena), a la cual se le agregó agua hasta que alcanzara la fluidez de  $110 \pm 5$ , ya lograda la fluidez se calculó la relación a/c de dicha mezcla, la cual fue de 1.01 y se fijó esta relación para todas las mezclas de los diferentes sustitutos a analizar. La fluidez de todas las mezclas se determinó según el procedimiento de la norma ASTM C 1437 – 01.

Cada mezcla se realizó dentro de una cubeta con capacidad de 19 litros aproximadamente (imagen 4-1), esto debido a que las cantidades de materiales excedían de 1 kg de cementante y 4 kg de arena, así que sería bastante difícil mezclar dichos materiales en un recipiente de porcelana como se acostumbra usualmente.



Imagen 4-1. Equipo y forma de mezclado.

Para el mezclado de dichos materiales se utilizó un taladro marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM, adicionado de unas Aspas Mezcladoras (imagen 4-1). Se fijó usar la cantidad de 1481gr de cementante, puesto que se cuantificó el volumen que se debía llenar en los especímenes que se elaborarían.

Se elaboraron dos mezclas por cada sustitución, con cantidades iguales de material. En la primer mezcla que se elaboró con la cual se obtuvo la fluidez deseada, se utilizaron las cantidades de material y se registraron las características de la mezcla indicadas en la 4-2, mismas que se tomaron como base para todas las sustituciones realizadas.

*Mauricio Arreola Sánchez*

Tabla 4-2. Cantidades y elementos que conforman las mezclas.

Elemento	cantidad
Cementante	1481 gr
Arena	4072 gr
Agua	1495 ml
Relación A/C	1.01
fluidez	110 ± 5
fluidificante	solo si no se cumple con la fluidez

Dichas proporciones de mezclas sirvieron de base para la elaboración de todos los especímenes de prueba para las 8 edades: 14, 28, 45, 90, 180, 360, 500 y 1000 días.

## 4.2 Pruebas destructivas

Dentro de las pruebas destructivas se agruparon todas aquellas en las que, una vez aplicado el procedimiento de análisis, el espécimen se pierde. Las pruebas destructivas aquí implementadas son: Carga axial (IAP), flexión, tensión, Adherencia y resistencia al ataque por sulfatos (prueba de durabilidad).

### Resistencia a compresión e índice IAP

Para el análisis de la resistencia a carga axial de las mezclas en estado endurecido se siguió el procedimiento de la norma ASTM C 109/C 109M – 02. La cual especifica la elaboración de cubos de 5mm por lado, dichos cubos deben ser llenados en cuatro capas con ocho golpes por capa. Se elaboraron 3 especímenes para cada edad de prueba y para cada mezcla, como ya se mencionó anteriormente, se elaboraron cubos para las edades de prueba de 14, 28, 45, 90, 180, 360, 500 y 1000 días.

En la fabricación de los cubos de mortero, se recubrieron los moldes con un desmoldante, esto con la finalidad de que al día siguiente cuando se descimbraran, el mortero no se adhiriera a las paredes del molde, para tal fin se utilizó aceite para transmisión mezclado con diésel en una parte más pequeña que el aceite, para que la mezcla no fuera tan líquida pero tampoco muy viscosa.

La prueba de compresión se realizó utilizando la máquina universal Tinius Olsen, se aplicó carga a velocidad constante en el rango de 5000kg, el cual tiene una aproximación a 0.5kg.

Con la prueba de resistencia a compresión de los morteros, también es posible determinar si los materiales sustitutos muestran algún indicio de reacción con los productos de

reacción del cemento (hidróxido de calcio), esto se logra mediante el cálculo del Índice de Actividad Resistente (IAR) o índice de Actividad Puzolánica (IAP). Según la norma ASTM C 311 – 00, existen dos formas de calcular dicho índice, el primero es mediante un análisis químico y el segundo es mediante un análisis físico. El método usado en esta investigación fue el segundo, el cual relaciona la resistencia a compresión del mortero testigo con la resistencia del mortero hecho con los materiales sustitutos.

### **Resistencia a flexión**

Para determinar la resistencia a la flexión de los morteros, fue necesaria la elaboración de “prismas”, especímenes de 40x40x160mm, según la norma ASTM C 348 – 02. Dicha norma especifica el cálculo del esfuerzo a la flexión mediante la siguiente fórmula “ $S_f = 0.0028 P$ ” donde  $S_f$  es el esfuerzo de flexión en MPa y  $P$  es la carga que soportó el espécimen expresada en newtons.

Para la fabricación de los prismas, se siguió el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de los cubos, es decir, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente. Al igual que los cubos se elaboraron los prismas para las edades de prueba de 14, 28, 45, 90, 180, 360, 500 y 1000 días.

La prueba de flexión se realizó (al igual que la carga axial) utilizando la máquina universal Tinius Olsen, se aplicó carga a velocidad constante en el rango de 5000kg, el cual tiene una aproximación a 0.5kg.

### **Resistencia a la tensión**

Para determinación de la resistencia a la tensión de los morteros, se fabricaron “briquetas” (especímenes en forma de cacahuate) con las mezclas y sustituciones correspondientes, se utilizaron moldes de bronce (imagen 4.2).

Para la fabricación de las briquetas, se siguió el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de los cubos, es decir, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente.

Puesto que no se encontró ninguna norma actual para la elaboración y prueba de las briquetas, se siguió el procedimiento descrito en el Manual de Análisis de Materiales de la facultad de ing. Civil de la U.M.S.N.H., tercera edición. El llenado de las briquetas consiste en llenar los moldes comprimiendo la mezcla con el dedo índice y enrazando con la ayuda de una espátula imagen 4-2, puesto que los moldes no tienen una base en la cual quedará

*Mauricio Arreola Sánchez*



la mezcla, el molde se puso sobre una superficie de cristal, engrasado previamente para evitar que la mezcla se adhiera a éste.

Después de la elaboración del número correspondiente de briquetas para las edades de prueba especificadas de 14, 28, 45, 90, 180, 360, 500 y 1000 días.



Imagen 4-2. Elaboración de briquetas.

La determinación de la resistencia a tensión realizada en briquetas, se efectuó en la máquina de prueba para tensión en morteros tipo Michaelis (imagen4-3), y el cálculo se realizó aplicando la fórmula  $RA = (P_m \times 50) / S_m$ , donde  $P_m$  es la carga registrada en kg y  $S_m$  es la sección media del espécimen en  $cm^2$ .



Imagen 4-3. Máquina para prueba de briquetas.

*Mauricio Arreola Sánchez*

### **Resistencia al ataque por sulfatos (durabilidad)**

Para la determinación de la durabilidad de los morteros estudiados, se realizó la prueba de resistencia a los sulfatos. Para el análisis de la resistencia al ataque por sulfatos, fue necesaria la elaboración de especímenes cúbicos de 50mm por lado, estos especímenes se elaboraron de la misma manera que los cubos para la prueba de resistencia a compresión, solo que en este caso se elaboraron 18 cubos por cada porcentaje de sustitución.

Los especímenes se sometieron a ataque por sulfato de sodio a la edad de 90 días, el procedimiento de la prueba de ataque fue siguiendo lo especificado en la norma ASTM C 88, la cual recomienda que la solución de para el ataque de los especímenes contenga no menos de 350g de sal anhidra de sulfato de sodio y que el ataque sea mediante ciclos de inmersión en dicha solución por un tiempo de 16-18h (previo a la primera inmersión los especímenes deben secarse hasta peso constante) y después un secado en horno a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante; así sucesivamente hasta concluir con los ciclos requeridos.

Para esta prueba se realizaron 5 ciclos a cada mezcla de mortero analizada, se registraron los pesos de los especímenes al terminar cada ciclo y también al término de cada ciclo se probaron 3 especímenes a carga axial para registrar su pérdida tanto de masa como de resistencia. Cabe mencionar que los pesos se registraron después del secado de cada ciclo, mientras que la resistencia de los especímenes se determinó en estado húmedo, es decir, después de la inmersión en la solución de ataque y previo al secado en horno; esto debido a que el resto de las pruebas mecánicas y no destructivas se realizaron es estado húmedo.

A los especímenes que se probaron a carga axial, también se les midió su resistividad eléctrica y velocidad de pulso, para analizar el comportamiento de las mismas ante el ataque por sulfatos.

#### *Curado de los especímenes*

De acuerdo la norma NMX-C-148-2010; ASTM-C-511-2003, el almacenaje inicial corresponde básicamente al lugar donde fueron elaborados los especímenes. La remoción de los moldes debe efectuarse a  $24 \pm 8$  horas luego de elaborado el elemento, procediendo a el almacenaje en un medio que permita el adecuado curado del mortero, en este caso la temperatura de curado debe ser  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  desde el momento del desmolde hasta el día de falla.

*Mauricio Arreola Sánchez*

A excepción de las mezclas elaboradas para las losas de concreto en que se efectuaron las pruebas de adherencia<sup>4</sup>, todos los especímenes fueron curados sumergiéndolos en agua (imagen 4-4).



Imagen 4-4. Curado de los especímenes.

### Resistencia a la adherencia

Para la realización de la prueba de adherencia (ASTM C 1583, 2004), se elaboraron unas losas de concreto de 1m<sup>2</sup> por 7 cm de espesor aproximadamente, estas fueron hechas con el fin de realizar sobre ellas la prueba de adherencia (imagen 4-5). Cabe mencionar que las losas se les colono malla electro soldada en bebida a la mitad del espesor de la losa, esto para aumentar la rigidez de las losa y evitar posibles accidentes cuando se descimbraran o se movieran de lugar. El concreto para la elaboración de las losas fue de una resistencia de 200 kg/cm<sup>2</sup>, con material pétreo de origen volcánico y se utilizó cemento CPC 30R RS.



Imagen 4-5. Losas (sustratos) para prueba de adherencia.

Una vez que se realizaron las perforaciones a las mezclas correspondientes se procedió a pegar los discos de acero inoxidable, esto se ilustra en la imagen 4-6, los cuales sirvieron

*Mauricio Arreola Sánchez*

para realizar dicha prueba, los discos se adhirieron al revestimiento mediante un epóxico marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel. Después de la aplicación se dejó secar el epóxico aproximadamente 3 o 4 horas. El equipo utilizado fue un equipo Pull Off, serie 05053201, marca ControlIns.



Imagen 4-6. Preparación de prueba de adherencia.

Cuando la prueba se realiza en la superficie de una reparación o un material de revestimiento, se determina la fuerza de adherencia con el sustrato o la resistencia a la tensión de cualquiera, del recubrimiento o del sustrato, lo que sea más débil.

La norma ASTM C 1583-04, especifica cuatro tipos de fallas que se pueden presentar durante la prueba (imagen 4-7) y para poder determinar el esfuerzo de adherencia o la resistencia a la tensión de alguno de los dos materiales (sustrato o mortero) se deben repetir tres tipos de fallas iguales. La prueba de adherencia se realizó a las edades de 14, 28, 45, 90 y 180 días.

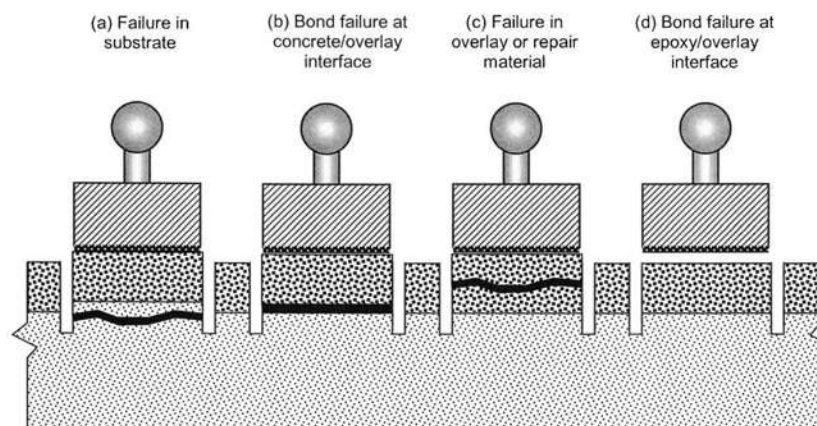


Imagen 4-7. Esquema de modos de falla.

Mauricio Arreola Sánchez

### 4.3 Pruebas no destructivas

Dentro de las pruebas no destructivas se agrupan aquellas que una vez realizadas no se pierde o daña el espécimen estudiado. Generalmente son técnicas de carácter indirecto que nos permiten estimar la calidad de los especímenes y mediante correlaciones o modelos se puede estimar sus características mecánicas.

Las pruebas no destructivas que se realizaron en esta investigación fueron Resistencia eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, porosidad total y densidad. Dichas pruebas fueron aplicadas a los especímenes previo a ser sometidos a las pruebas mecánicas (destructiva) a cada edad correspondiente.

#### Resistencia eléctrica

Para garantizar una mejor calidad de construcción y durabilidad, se ha producido un creciente interés en los últimos años en el desarrollo de una mejor base para el control de calidad basado en el rendimiento de la calidad del hormigón durante la construcción de concreto <sup>[103,104]</sup>. La resistividad puede estar relacionada con la corrosión y la protección de refuerzo de acero y con los indicadores de durabilidad <sup>[105]</sup>. En general, una baja resistividad está relacionada con un alto riesgo de corrosión.

La resistividad eléctrica del hormigón se relaciona con la micro-estructura de la matriz de cemento, su estructura de poros, porosidad y distribución de tamaño de poro. También es una función de la concentración de iones y su movilidad en la solución de los poros <sup>[106]</sup>. La química del cemento, contenido de cemento, relación agua/cemento y el uso de aditivos y materiales cementosos suplementarios son factores que influyen en la microestructura de la matriz de cemento del hormigón, así como la química de la solución de los poros, y por lo tanto influyen en su resistividad eléctrica <sup>[107]</sup>.

La resistividad eléctrica del hormigón puede variar en un amplio intervalo, de  $10^1$  a  $10^5 \Omega m$ . En general, la resistividad eléctrica del hormigón aumentará con el tiempo. Los aumentos serán mayores para el curado al aire que el curado húmedo. Esto se debe a que, para el curado húmedo el aumento de la resistividad se producirá principalmente debido al aumento de la hidratación del cemento y el llenado de los poros con productos de hidratación, mientras que para el curado al aire, la resistividad aumentará debido a la pérdida de humedad del hormigón <sup>[108]</sup>.

Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo resistímetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos, marca Nilsson. En el cual la

*Mauricio Arreola Sánchez*



resistividad eléctrica está dada por:  $\rho = R_e(A/L)$ . Dónde;  $\rho$  es la resistividad eléctrica en  $K\Omega\text{-cm}$  (ohm-m),  $R_e$  es la resistencia eléctrica que el equipo proporciona en  $K\Omega$ ,  $A$  es el área transversal del espécimen en  $\text{cm}^2$  y  $L$  es la longitud del espécimen en cm.

### **Velocidad de pulso ultrasónico**

La detección de propagación de las ondas ultrasónicas (longitudinales de la onda P, ondas de corte y la onda de superficie S) en un medio elástico se considera como uno de los métodos no destructivos más importantes para evaluar la calidad de una variedad de materiales de construcción <sup>[109]</sup>.

El cambio que la velocidad de una onda ultrasónica sufre con el tiempo durante el fraguado y el endurecimiento del hormigón, ya se discute en varios trabajos <sup>[110, 111, 112]</sup>. En todas las curvas de velocidad se pueden distinguir las siguientes partes características. La primera parte es el período de reposo, caracterizado por un valor constante de velocidad baja. Después de este período, la velocidad aumenta rápidamente al principio (segunda etapa) y luego más gradualmente (tercera etapa) para finalmente llegar a un valor asintótico.

#### *Velocidad de la onda inicial durante el período de reposo*

Inmediatamente después de la mezcla, la velocidad de la onda-p en las pastas de cemento, así como en el mortero y el hormigón a menudo alcanza valores inferiores a 600 m/s, según lo informado por varios investigadores <sup>[113, 114, 115]</sup>, mientras que las ondas ultrasónicas se pueden propagar a través de agua a una velocidad de aproximadamente 1500 m/s.

#### *Aumento de la velocidad de la onda durante la hidratación y la velocidad final*

De acuerdo con Voigt et al. <sup>[116]</sup>, el muy temprano aumento en la velocidad de la onda P no se atribuye a la configuración. Productos de hidratación, tales como etringita no crear partículas conectados y tienen poca o ninguna influencia en el proceso de rigidización. Sin embargo, se llenan espacio de los poros como resultado de que la porosidad y el contenido de aire disminuyen y la velocidad aumenta. La colonización interna debida a la gravedad provoca un mejor acoplamiento mecánico de las partículas sin un vínculo real. Sin embargo, el mayor aumento de la velocidad tiene lugar durante la configuración, cuando los hidratos de cemento comienzan a filtrarse y formar vías completas de partículas conectadas para la onda de pulso ultrasónico <sup>[115]</sup>. El mortero u hormigón comienza a adquirir resistencia mecánica y con el tiempo pueden ser tratados como

*Mauricio Arreola Sánchez*

material sólido elástico homogéneo con un módulo de elasticidad y una relación de Poisson.

Dado que la velocidad ultrasónica es una medida de la rigidez de la muestra de hormigón endurecido, la rigidez parece desarrollarse más lento con el aumento del contenido puzolanas. Esta desaceleración se atribuye al hecho de que la hidratación de la puzolana no se inicia hasta que la cal liberada durante la hidratación de cemento portland proporciona la alcalinidad correcta <sup>[117,118]</sup>.

El método de transmisión ultrasónica dibuja un panorama más completo del proceso de fraguado que, por ejemplo, el método de resistencia a la penetración. El aumento de la velocidad ultrasónica durante el fraguado es generalmente retardado si más del 30% de la cemento portland se sustituye por escoria. Para el hormigón que contiene altos porcentajes de escoria (85% del material de cemento o más), un segundo aumento en el gráfico de velocidad se atribuye a la contribución de los productos de hidratación de escoria, se puede detectar después de aproximadamente 24 h. Este fenómeno no es capturado por el método de resistencia a la penetración. <sup>[119]</sup>

El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9µs; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1µs; salida del transmisor hasta 1500V.

El procedimiento de dicha prueba se realizó siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C 597 – 02.

### **Porosidad total**

Como ya se explicó en el capítulo 2, la porosidad es uno de los principales factores que determinan la durabilidad del concreto y el mortero ya que en medida en que esta sea mayor o menor, los iones y agentes que degradan la matriz de cemento pueden avanzar más rápida o lentamente. También se explicó que la porosidad depende de la relación agua/cementante y del grado de hidratación del cementante.

Para la determinación de la porosidad total se utilizó un método de gravedad <sup>[120,121]</sup>. El cual consiste en saturar una muestra de mortero bajo vacío. Una vez que está completamente saturada, es pesado con precisión centígramo y su volumen está

*Mauricio Arreola Sánchez*



determinado por el peso hidrostático. Entonces, la muestra es secada al horno a una temperatura de  $60 \pm 2^\circ\text{C}$ . El secado se detiene cuando el peso de la muestra permanece constante, que es cuando la variación entre dos ponderaciones sucesivas es menor de 0.05%. La porosidad se determina como:

$$P = (M_{\text{sat}} - M_{\text{seco}}) / (\rho_a * V)$$

Dónde:  $M_{\text{sat}}$  es el peso de la muestra completamente saturado,  $M_{\text{seco}}$  el peso de la muestra seca y  $\rho_a$  la densidad de masa de agua.

Es preciso mencionar que en la presente investigación no se siguió el procedimiento como lo dicta el método. Por cuestiones de tiempo y volumen de especímenes a analizar, se decidió utilizar las muestras saturadas bajo inmersión a presión atmosférica, es decir, dado que las muestras estuvieron en agua de curado desde su elaboración hasta el momento de la prueba se asumió que estaban completamente saturadas. Y el secado se realizó en horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 horas.

### **Densidad**

La densidad es una medida de cuánto material se encuentra comprimido en un espacio determinado; es la cantidad de masa por unidad de volumen. La masa volumétrica del concreto y del mortero varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (ocluido) o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento.

El peso del concreto seco es igual al peso de los ingredientes del concreto fresco menos el peso del agua de mezclado evaporable. Parte del agua de la mezcla combina químicamente con el cemento durante el proceso de hidratación, transformando el cemento en un gel de cemento. Además, parte del agua permanece fuertemente retenida en los poros y en los capilares y no se evapora bajo las condiciones normales. la cantidad real depende del contenido inicial de agua, de las características de absorción de los agregados y del tamaño y forma de los miembros del concreto.<sup>[11]</sup>

La prueba de densidad se le aplica a los especímenes cúbicos de cada material por cada porcentaje, el procedimiento que se sigue es el que se indica en el Manual de Análisis de Materiales, de la UMSNH, Tercera edición. Los cálculos para obtener la densidad de los especímenes cúbicos se hace con la siguiente formula: Densidad = Masa (gr) / Volumen ( $\text{cm}^3$ ).

*Mauricio Arreola Sánchez*

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS

### 5.1 caracterización de los áridos

En este apartado se complementa la información presentada en el capítulo 3, en el cual se presentaron las imágenes microscópicas de las dos arenas empleadas en la investigación; ahora se presentan los resultados de la caracterización según las normas para uso en la elaboración de morteros y concretos.

#### 5.1.1 Arena de Huajúbaro

Para la caracterización de ambas arenas, se realizaron las pruebas siguientes:

##### Humedad actual

La humedad actual se determinó según la norma NMX-C-66-ONNCCE-2006. Se utilizó la fórmula:  $H. Actual = ((Mh - Ms) / Ms) * 100$ , los resultados se muestran en la tabla 5-1.

Tabla 5-1. Humedad Actual del arena 1.

Mh (gr)	Ms (gr)	H. Actual (%)
300	297.7	0.773
300	298.2	0.604
300	297.4	0.847
<b>Promedio =</b>		<b>0.741</b>

##### Humedad de absorción

La humedad de absorción se obtuvo siguiendo la especificación NMX-C-165-ONNCCE-2004, mediante la siguiente fórmula:  $H. Absorción = ((Mh - Ms) / Ms) * 100$ , los resultados se muestran en la tabla 5-2.

Tabla 5-2. Humedad de Absorción arena 1.

Mh (gr)	Ms (gr)	H. Abs. (%)
301.8	290.8	3.78
300.5	290	3.62
304.2	293.1	3.78
<b>Promedio =</b>		<b>3.727</b>

### Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS)

La prueba se realizó según la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004. Se realizaron 3 pruebas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la tabla 5-3.

Tabla 5-3. Masa volumétrica seca suelta arena 1.

M (gr)	V (gr)	MVSS (gr/cm <sup>3</sup> )
3455	2783	1.241
3405	2783	1.223
3375	2783	1.213
<b>Promedio =</b>		<b>1.226</b>

### Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSV)

Se realizó en base a la norma NMX – C – 073 – ONNCCE – 2004. Se realizaron 3 pruebas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la tabla 5-4.

Tabla 5-4. Masa Volumétrica seca varillada de arena 1.

M (gr)	V (gr)	MVSS (gr/cm <sup>3</sup> )
3655	2783	1.313
3755	2783	1.349
3705	2783	1.331
<b>Promedio =</b>		<b>1.331</b>

### Colorimetría

Esta es una prueba de carácter visual, que nos permite determinar el contenido de materia orgánica en el agregado. Los resultados se muestran en la tabla 5-5 y en la imagen 5-1.

Tabla 5-5. Colorimetría de arena 1.

Prueba	Colorimetría
1	Escala 3
2	Escala 3
3	Escala 3

El límite establecido para la aceptación de un árido en la construcción es la escala 3 dentro de un total de 5 (imagen 5-1), por lo tanto el contenido de materia orgánica de la arena es aceptable.

*Mauricio Arreola Sánchez*



Imagen 5-1. Escala colorimétrica.

### Sedimentación

De igual manera que la prueba de colorimetría, esta prueba es también de carácter visual y se utiliza para determinar si el contenido de finos del árido está dentro un rango determinado entre los volúmenes de 414 y 444 (imagen 5-2), para este caso el resultado es aceptable.



Imagen 5-2. Sedimentación de arena 1.

### Material que pasa por la malla n° 200 en arena

Esta prueba determina la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla n° 200. Los resultados se muestran en la tabla 5-6.

*Mauricio Arreola Sánchez*

Tabla 5-6. Finos que pasan la malla N° 200 arena 1.

Mi (gr)	Mf (gr)	Finos (%)
582.3	569.1	2.319
546.9	536.8	1.882
565.9	556.2	1.744
<b>Promedio =</b>		<b>1.982</b>

### Prueba de terrones de arcilla

Es útil para conocer la cantidad de terrones de arcilla que contiene una arena, ya que son partículas de baja resistencia estructural, que además en contacto con el agua forman lodos que contaminan el concreto, cuando e encuentran en abundancia formando parte de la arena. Los resultados se muestran en la tabla 5-7.

Tabla 5-7. Contenido de terrones de arena 1.

Mi (gr)	Mf (gr)	Terrones (%)
106.6	104.1	2.402
101.2	99.5	1.709
106.9	103.4	3.385
<b>Promedio =</b>		<b>2.498</b>

### 5.1.2 Arena del rio Lerma

A este árido se caracterizó mediante las mismas pruebas que el anterior; es necesario mencionar que las pruebas en las que no se especifica la norma mediante la cual se elaboraron, fueron realizadas según lo dictaminado por el Manual de Análisis de Materiales, de la Facultad de Ing. Civil, de la UMSNH, Tercera edición.

#### Humedad actual

La humedad actual se determinó según la norma NMX-C- 66 –ONNCCE–2006. Se utilizó la fórmula:  $H. Actual = ((Mh-Ms)/Ms)*100$ , los resultados se muestran en la tabla 5-8.

Tabla 5-8. Humedad Actual de arena 2.

Mh (gr)	Ms (gr)	H. Actual (%)
300	297.4	0.874
300	298.4	0.536
300	297.2	0.942
<b>Promedio =</b>		<b>0.784</b>

Mauricio Arreola Sánchez

### Humedad de absorción

La humedad de absorción se obtuvo siguiendo la especificación NMX-C-165-ONNCCE-2004, mediante la siguiente fórmula:  $H. \text{ Absorción} = ((M_h - M_s) / M_s) * 100$ , los resultados se muestran en la tabla 5-9.

Tabla 5-9. Humedad de Absorción arena 2.

Mh (gr)	Ms (gr)	H. Abs. (%)
300	289.4	3.663
300	291.2	3.022
300	284.5	5.448
<b>Promedio =</b>		<b>4.044</b>

### Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS)

La prueba se realizó según la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004. Se realizaron 3 pruebas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la tabla 5-10.

Tabla 5-10. MVSS de arena 2.

M (gr)	V (gr)	MVSS (gr/cm <sup>3</sup> )
3800	2759	1.377
3700	2759	1.341
3700	2759	1.341
<b>Promedio =</b>		<b>1.353</b>

### Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSV)

Se realizó en base a la norma NMX - C - 073 - ONNCCE - 2004. Se realizaron 3 pruebas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la tabla 5-11.

Tabla 5-11. MVSV de arena 2.

M (gr)	V (gr)	MVSS (gr/cm <sup>3</sup> )
4000	2759	1.450
3900	2759	1.414
4050	2759	1.468
<b>Promedio =</b>		<b>1.444</b>

### Colorimetría

Esta es una prueba de carácter visual, que nos permite determinar el contenido de materia orgánica en el agregado. Los resultados se muestran en la tabla 5-12.

Tabla 5-12. Colorimetría de arena 2.

Prueba	Colorimetría
1	Escala 3
2	Escala 3
3	Escala 3

En esta prueba se obtuvo un nivel de escala para la colorimetría del número tres (imagen 5-3), por lo que nos indica que nuestra arena está dentro de los límites permisibles del contenido de materiales orgánicos en una arena. Si se fuera a utilizar esta arena para la mezcla, no fuera necesario hacer un lavado de arena.



Imagen 5-3. Colorimetría arena 2.

### Sedimentación

Como el material fino no rebasa el límite de la marca de 444 (imagen 5-4), se considera un material aceptable para el contenido de finos, por lo que se podría utilizar para la elaboración de una mezcla.

*Mauricio Arreola Sánchez*





Imagen 5-4. Sedimentación de arena 2.

### Prueba de terrones de arcilla

Las especificaciones dan un porcentaje admisible de terrones de arcilla en la arena del 0.5% y un máximo permisible del 1%. En este caso que la arena sobrepasa los límites de porcentaje de terrones de arcilla en más del 1% (tabla 5-13) sería necesario hacer un estudio económico tendiente si es factible cambiar el material o proceder a lavar la arena contaminada para eliminar la arcilla. Afortunadamente el material que se utiliza es el que se criba entre las mallas N° 16 y N° 30 y queda casi en su totalidad libre de contaminantes.

Tabla 5-13. Contenido de terrones de arena 2.

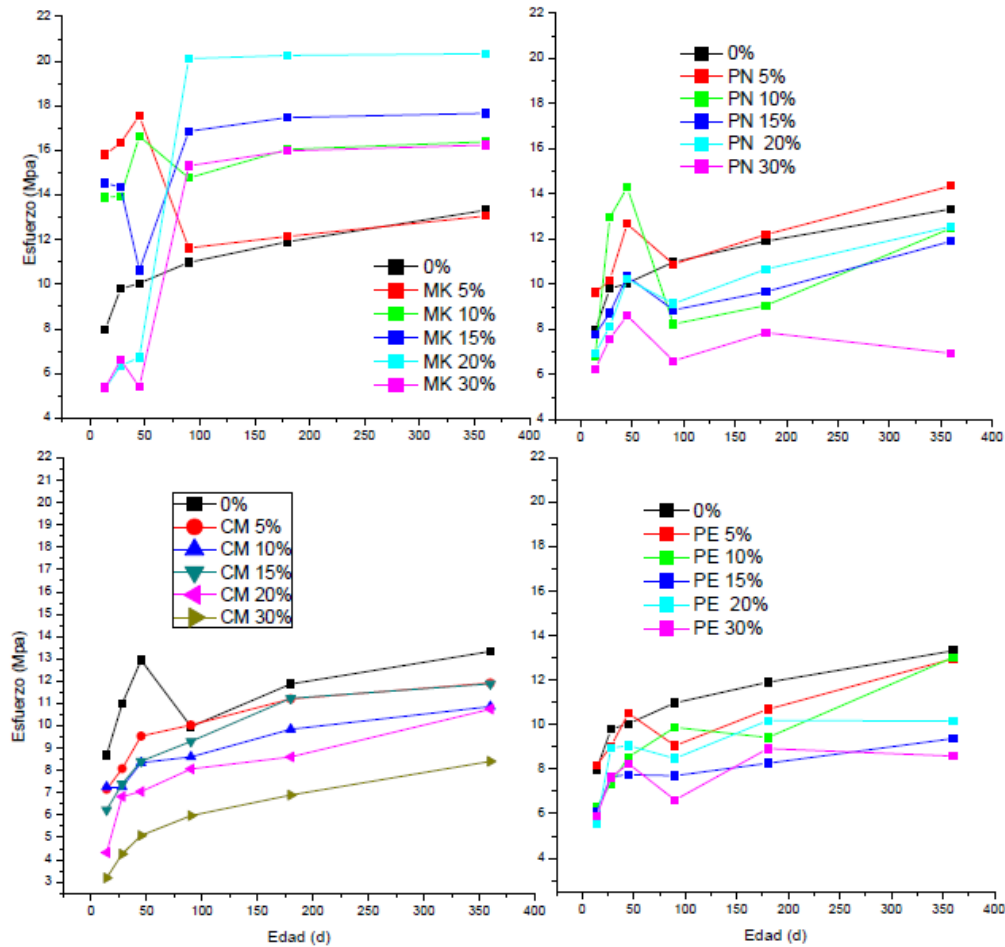
Mi (gr)	Mf (gr)	Terrones (%)
100	90.7	10.254
100	95.5	4.712
100	91.3	9.529
<b>Promedio =</b>		<b>8.165</b>

## 5.2 Pruebas mecánicas

Dado que los diez materiales estudiados como sustitutos se dividieron en 4 diferentes grupos, los resultados de las pruebas realizadas se presentaran en función de estos 4 grupos de materiales.

### 5.2.1 Carga axial

#### Materiales de alta temperatura



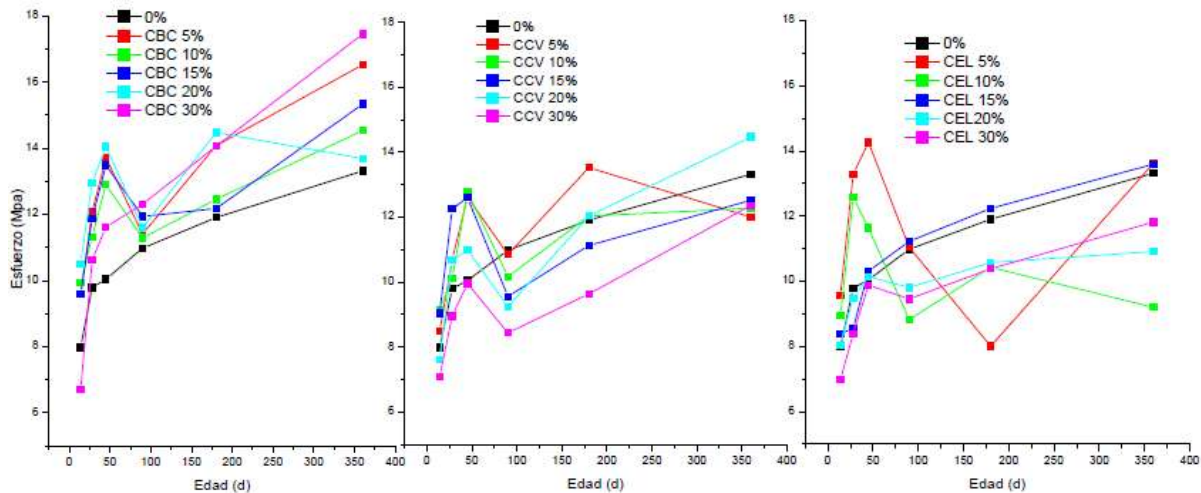
Grafica 5-1. Comportamiento a compresión de los materiales de alta temperatura.

En la gráfica 5-1, se puede apreciar como solo el MK supera la resistencia del testigo en todos los porcentajes de sustitución, siendo el MK20% el que presenta la mayor resistencia; para el caso de PN solo el 5% de sustitución logra desarrollar una resistencia ligeramente superior al testigo, siendo esta más notoria a la edad de 360 días; mientras que para el CM y PE ningún porcentaje de sustitución logra alcanzar el comportamiento del testigo, solo para PE 5 y 10% se aprecia una tendencia a la alza en la edad de 360 días.

Cabe mencionar que en la gráfica 5-1, se aprecian los líneas testigo la correspondiente a PE, PN y MK es en la que se usó arena de Huajúbaro y la segunda, correspondiente a CM es la en la que se usó arena del río Lerma.

Mauricio Arreola Sánchez

### Cenizas orgánicas

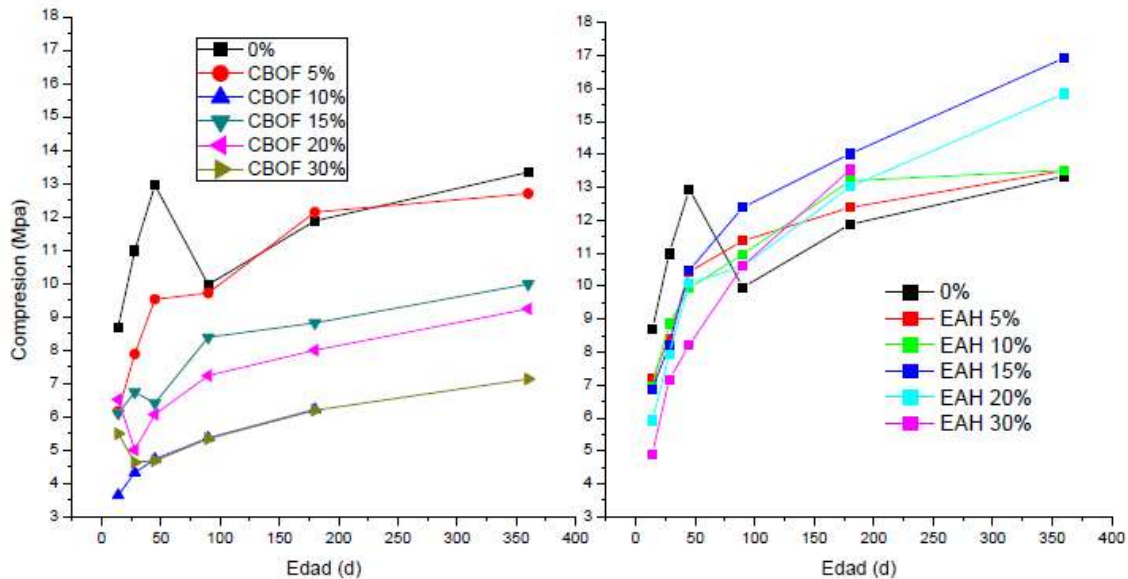


Grafica 5-2. Comportamiento a compresión de cenizas orgánicas.

Para el caso de la gráfica 5-2, solo se presenta el testigo hecho con arena de Huajúbaro. De igual manera que los materiales de alta temperatura, en los materiales del grupo de cenizas orgánicas solo la CBC supera en todos los porcentajes de sustitución al testigo, siendo las sustituciones de CBC 5 y 30% los que desarrollaron la mayor resistencia; para el caso de la CCV solo el 20% de sustitución supera el testigo y solo a la edad de 360 días; y para la CEL solo el 15% de sustitución muestra un comportamiento muy similar al testigo y ligeramente superior al mismo a partir de la edad de 45 días.

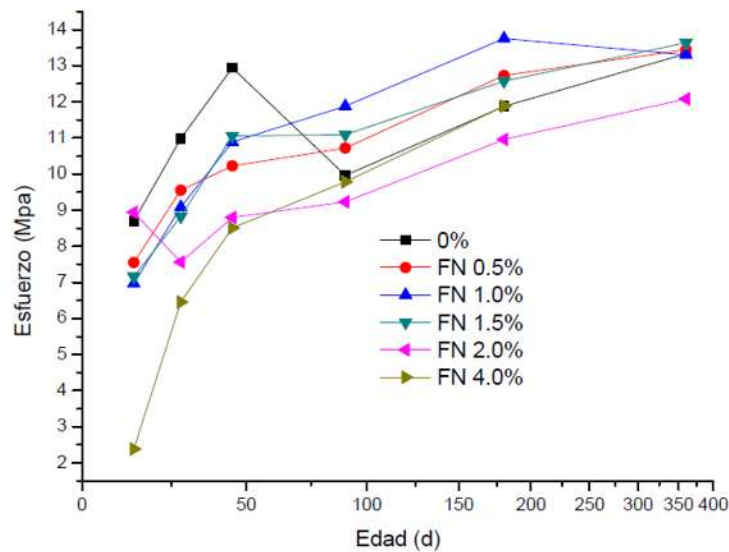
### Residuos industriales

Para el caso de los materiales de residuos industriales (gráfica 5-3) solo es presenta el testigo hecho con arena del rio Lerma. Para estos materiales solo el EAH supero al testigo en prácticamente todos los porcentajes de sustitución pero hasta después de los 90 días de edad, siendo los porcentajes del 15 y 20% los que alcanzaron la mayor resistencia a la edad de 360 días; En las sustituciones del CBOF solo el 5% de sustitución logra desarrollar un comportamiento semejante al testigo pero ligeramente inferior al mismo en la edad de 360 días.



Gráfica 5-3. Comportamiento a compresión de los residuos industriales.

### Fibras orgánicas



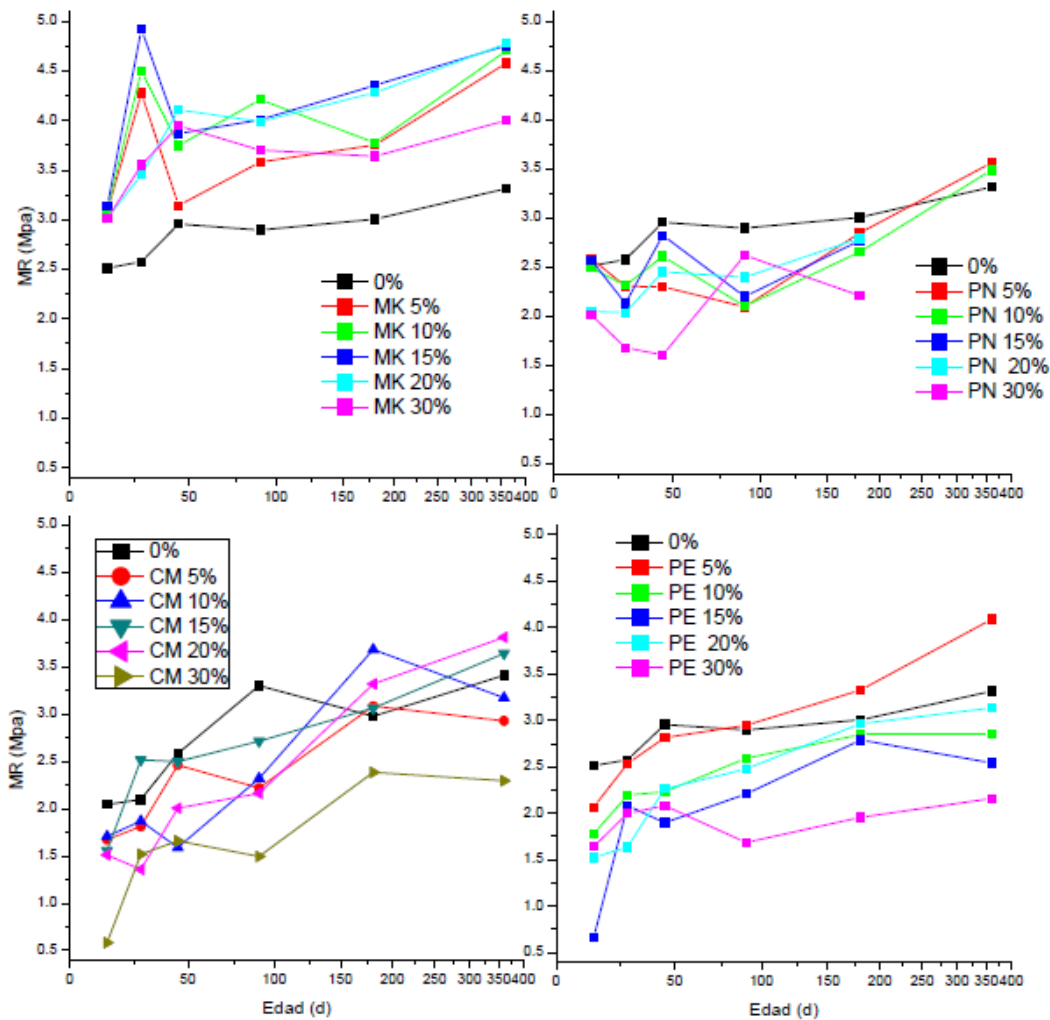
Gráfica 5-4. Comportamiento a compresión de la FN.

Para el grupo de fibras orgánicas solo se estudió un material FN (gráfica 5-4) y se compara con el testigo hecho con arena del rio Lerma, el comportamiento es superior al testigo para las sustituciones de 0.5 al 1.5% en edades de 90 y 180 días pero mostrándose con la misma resistencia a la edad de 360 días.

Mauricio Arreola Sánchez

## 5.2.2 Flexión

### Materiales de alta temperatura

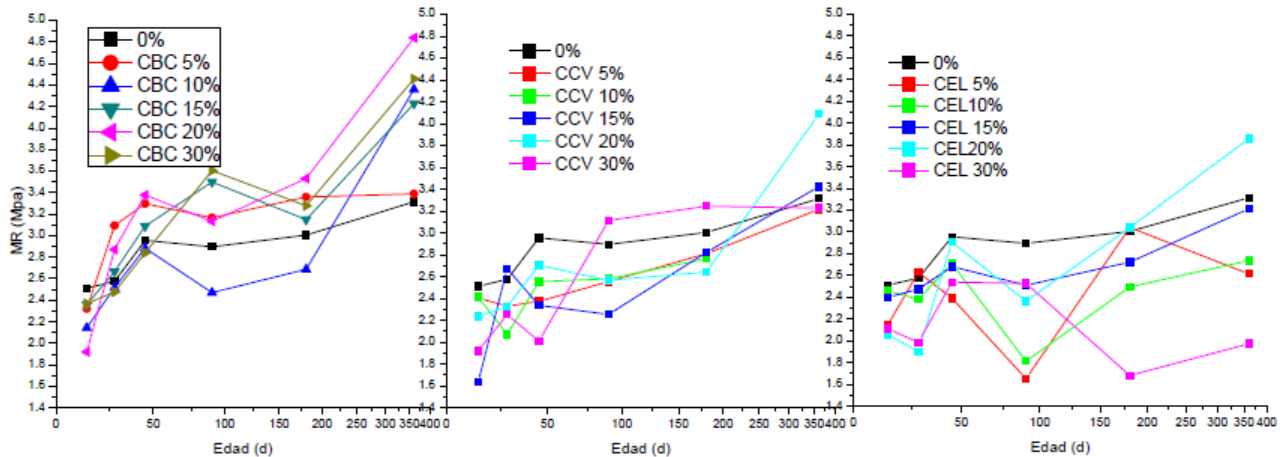


Grafica 5-4. Comportamiento a flexión de materiales de alta temperatura.

Al igual que en el comportamiento a compresión, en la gráfica 5-4 se aprecia que solo el MK supero al testigo en todos sus porcentaje de sustitución, siendo el 15 y 20% los que muestran el mejor comportamiento; la PN supera el testigo solo en los porcentajes de 5 y 10% y solo a la edad de 360 días, aunque aún falta evaluar el resto de las sustituciones a dicha edad; En el caso del CM se tuvo mucha variabilidad en el comportamiento, siendo los porcentajes de 15 y 20 los más estables y los que superan el testigo desde la edad de 180 días; la PE muestra un comportamiento generalmente inferior al testigo en las edades

tempranas, incrementándose hasta casi alcanzar el testigo en las edades superiores a los 90 días, siendo solamente el 5% de sustitución la que supera al testigo desde dicha edad.

### Cenizas orgánicas

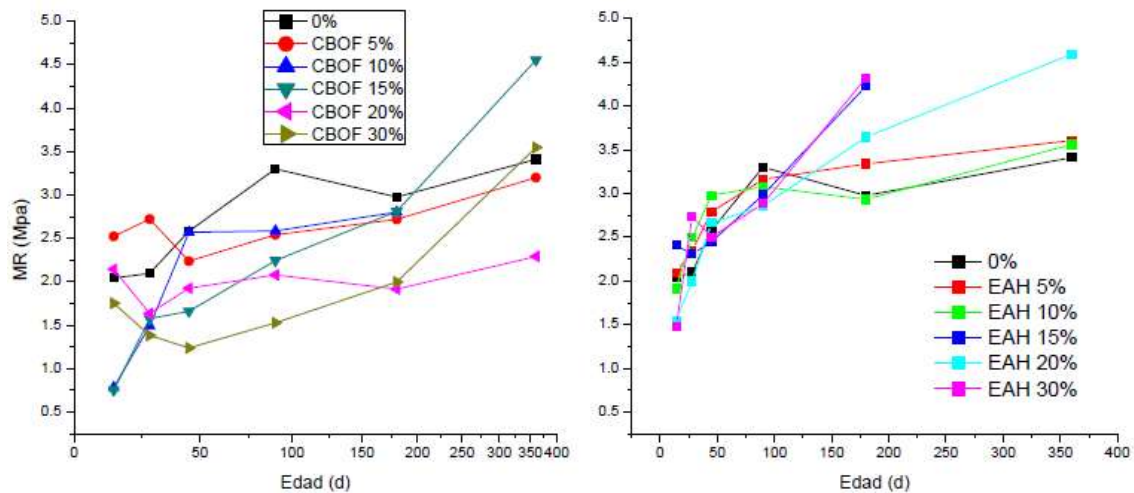


Gráfica 5-5. Comportamiento a flexión de cenizas orgánicas.

El comportamiento a flexión de las cenizas orgánicas a flexión (gráfica 5-5) es muy similar al comportamiento a compresión. Solo la CBC supera en todos sus porcentajes al testigo a partir de la edad de 28 días, siendo el 20% de sustitución la que muestra la mayor resistencia; en la CCV el comportamiento es inferior en casi todos los porcentajes pero a la edad de 360 días el comportamiento general es prácticamente igual al testigo, siendo los porcentajes de 15 y 20% los que alcanzaron la mayor resistencia; En el caso de la CEL la variabilidad es notoria en casi todos los porcentajes (excepto para el 15%) y se ubica por debajo del testigo en todas las edades de prueba, salvo el 15% que lo iguala a 360 días y el 20% de lo supera a la misma edad.

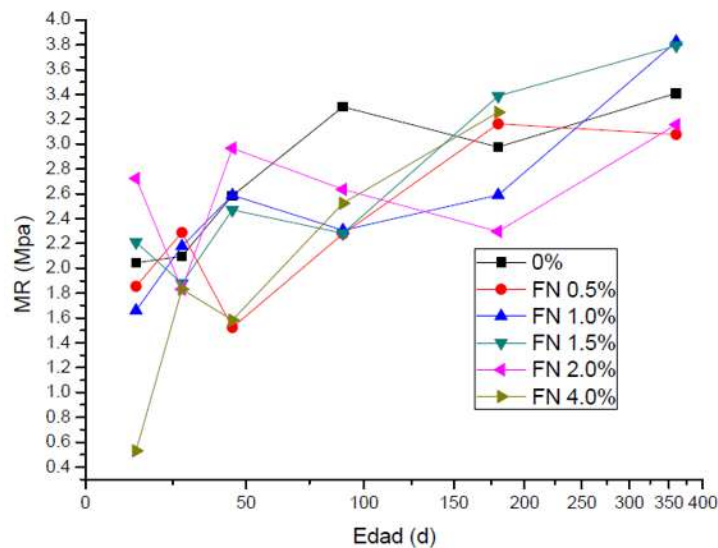
### Residuos industriales

En el comportamiento a flexión del CBOF (gráfica 5-6) se observa mucha variabilidad de resistencia y un comportamiento inferior al testigo en las edades tempranas, mostrando un incremento a la edad de 360 días para los porcentajes de 15 y 30 logrando superar al testigo; la EAH muestra un comportamiento más uniforme que la CBOF, teniendo resistencias prácticamente iguales al testigo a edades tempranas, para las edades de 180 y 360 días se separan los porcentajes siendo el 20% la que logra mayor resistencia aun que aun falta de probar los porcentajes de 15 y 30 a la edad de 360 días.



Gráfica 5-6. Comportamiento a flexión de los residuos industriales.

### Fibras orgánicas



Gráfica 5-7. Comportamiento a flexión de la FN.

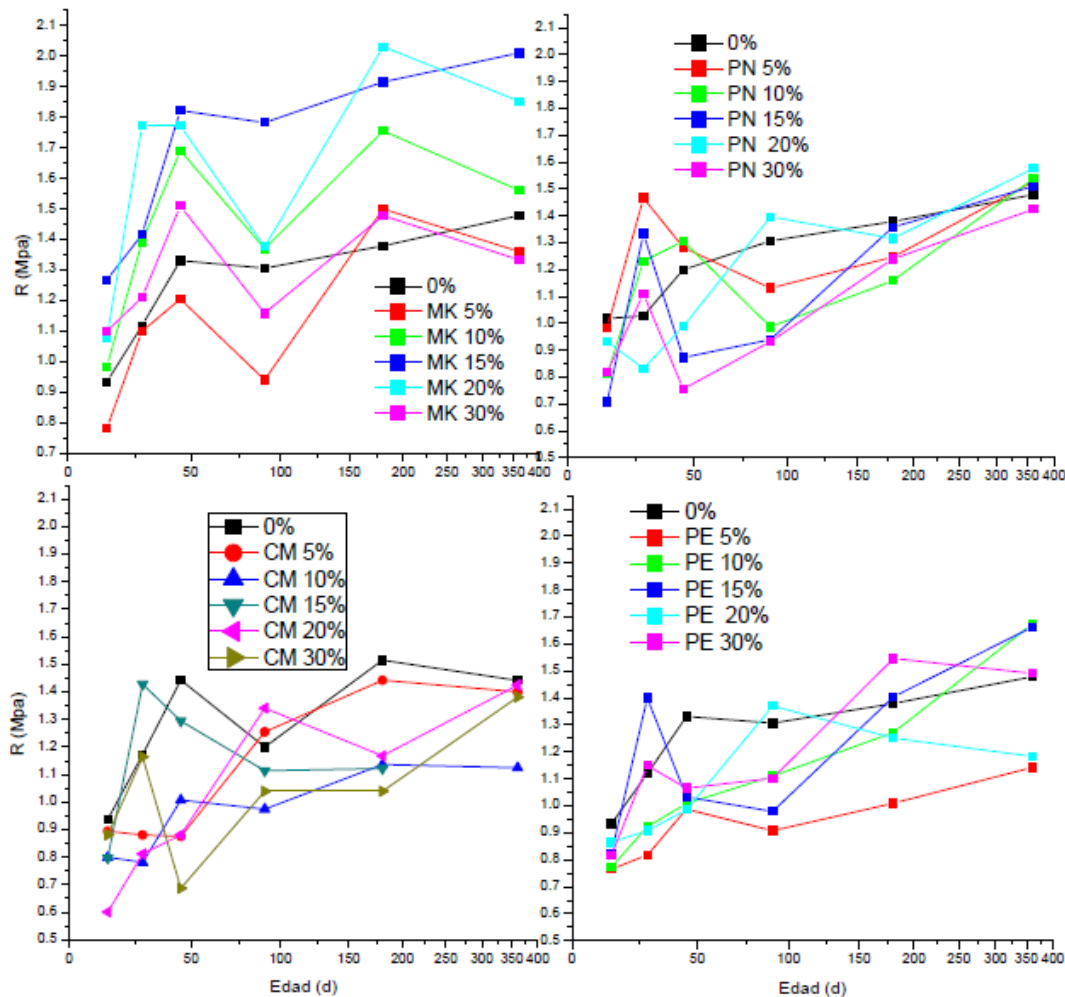
En la gráfica 5-7 se muestra el comportamiento de la FN a flexión, al igual que varios de los otros materiales estudiados, la FN muestra mucha variabilidad de resistencia y en general un comportamiento inferior al testigo a edades tempranas, mismo que se incrementa en edades de 180 y 360 días para los porcentajes de 1 y 1.5 de sustitución, aunque aún falta probar a la edad de 360 días el porcentaje de 4%.

Mauricio Arreola Sánchez



### 5.2.3 Tensión

#### Materiales de alta temperatura

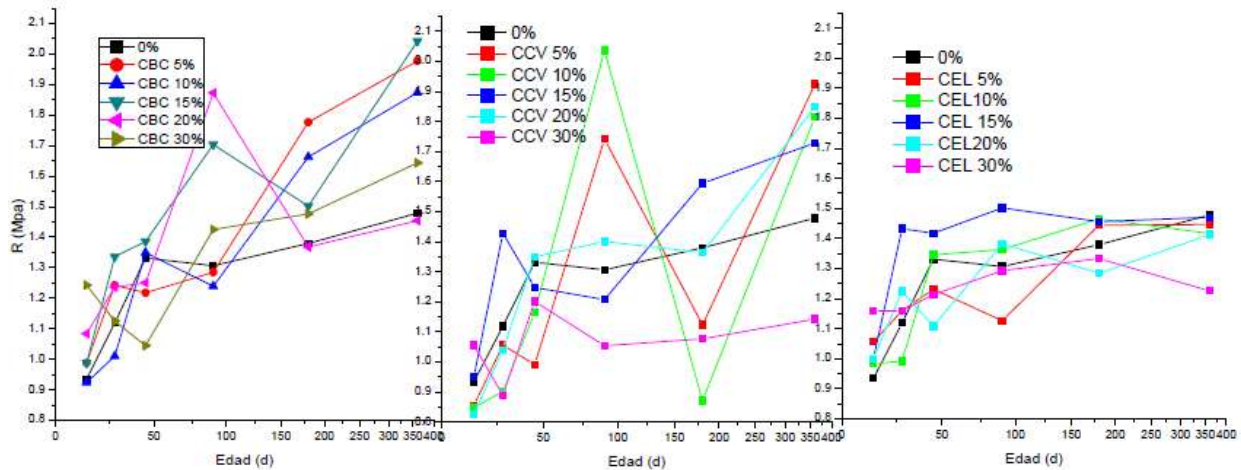


Grafica 5-8. Comportamiento a tensión de materiales de alta temperatura.

En la gráfica 5-8 se muestra el comportamiento a tensión de los materiales de alta temperatura, de los cuales solo el MK superó al testigo en casi todos los porcentajes a diferentes edades, siendo el 15% el que mostró el comportamiento más uniforme y de mayor resistencia; para los casos de PE y PN ambos tuvieron un desempeño inferior al testigo y mucha variabilidad de resistencias, los porcentajes que mejor se comportaron, para estos dos materiales, fueron el PN 20% y PE 10% y 15%; En el caso del CM también se aprecia variabilidad y desempeño inferior al testigo aunque a la edad de 360 días los porcentajes de 5, 20 y 30% alcanzan la misma resistencia que el testigo.

Mauricio Arreola Sánchez

### Cenizas orgánicas

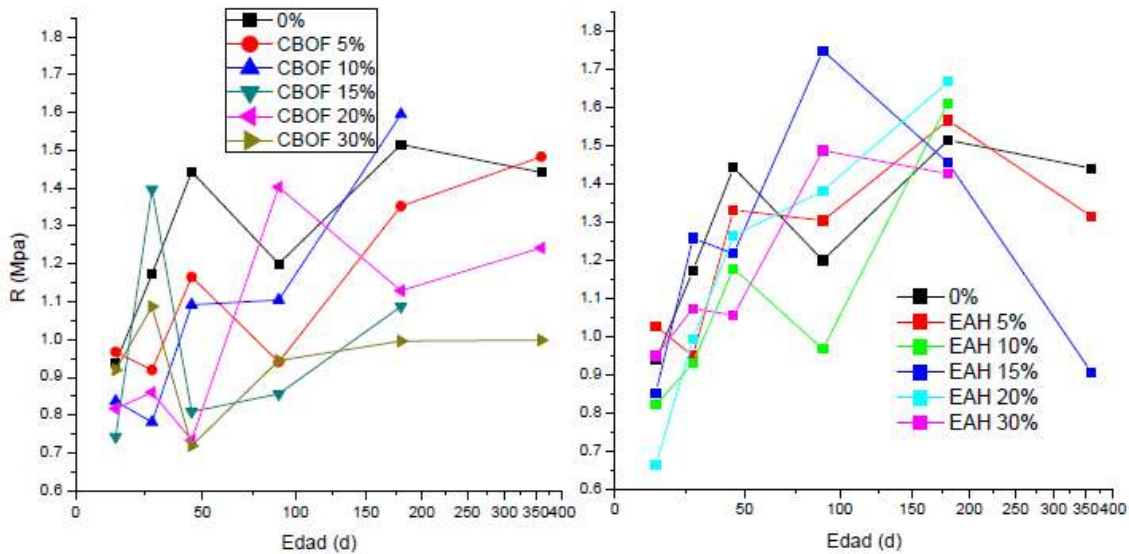


Grafica 5-9. Comportamiento a tensión de cenizas orgánicas.

En la gráfica 5-9 se observa que de nuevo la CBC es la única ceniza que supera al testigo en todos los porcentajes a diferentes edades, aun que muestra bastante variabilidad es las resistencias, para esta ceniza el porcentaje con mejores características es el CBC 15%; la ceniza CCV muestra aún más variabilidad que la CBC y el porcentaje que mejor se comporto fue el CCV 15%; para el caso de CEL la variabilidad disminuye notablemente y dos de sus porcentajes se comporta de forma muy similar al testigo en todas las edades, dicho porcentajes son el CEL 10 y 15%.

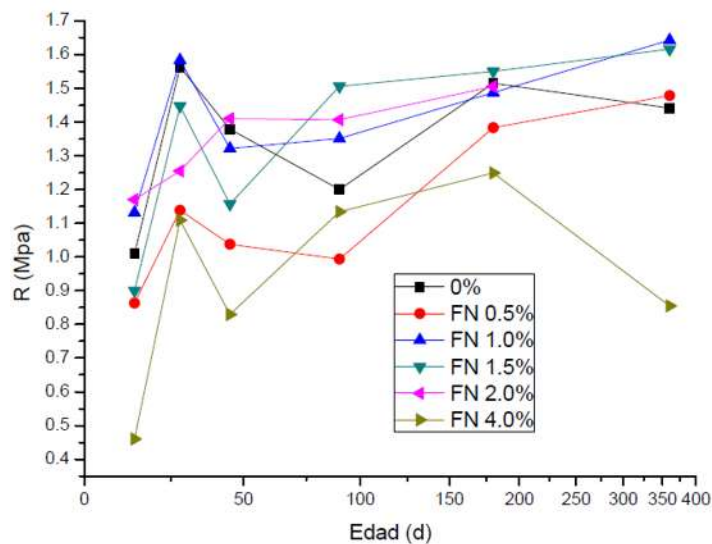
### Residuos industriales

Como se puede observar en la gráfica 5-10, el comportamiento del CBOF es en general inferior al testigo y solamente los porcentajes de 5 y 15% lo superan a las edades de 180 y 360 días respectivamente; en el caso de la EAH se observa un mejor desempeño ya que casi todos los porcentajes se comportan de forma similar al testigo y la variabilidad es menor que la CBOF, siendo los porcentajes de 10 y 20% los que lograron mayor resistencia aun que aun resto por probarlos a la edad de 360 días.



Gráfica 5-10. Comportamiento a tensión de residuos industriales.

### Fibras orgánicas



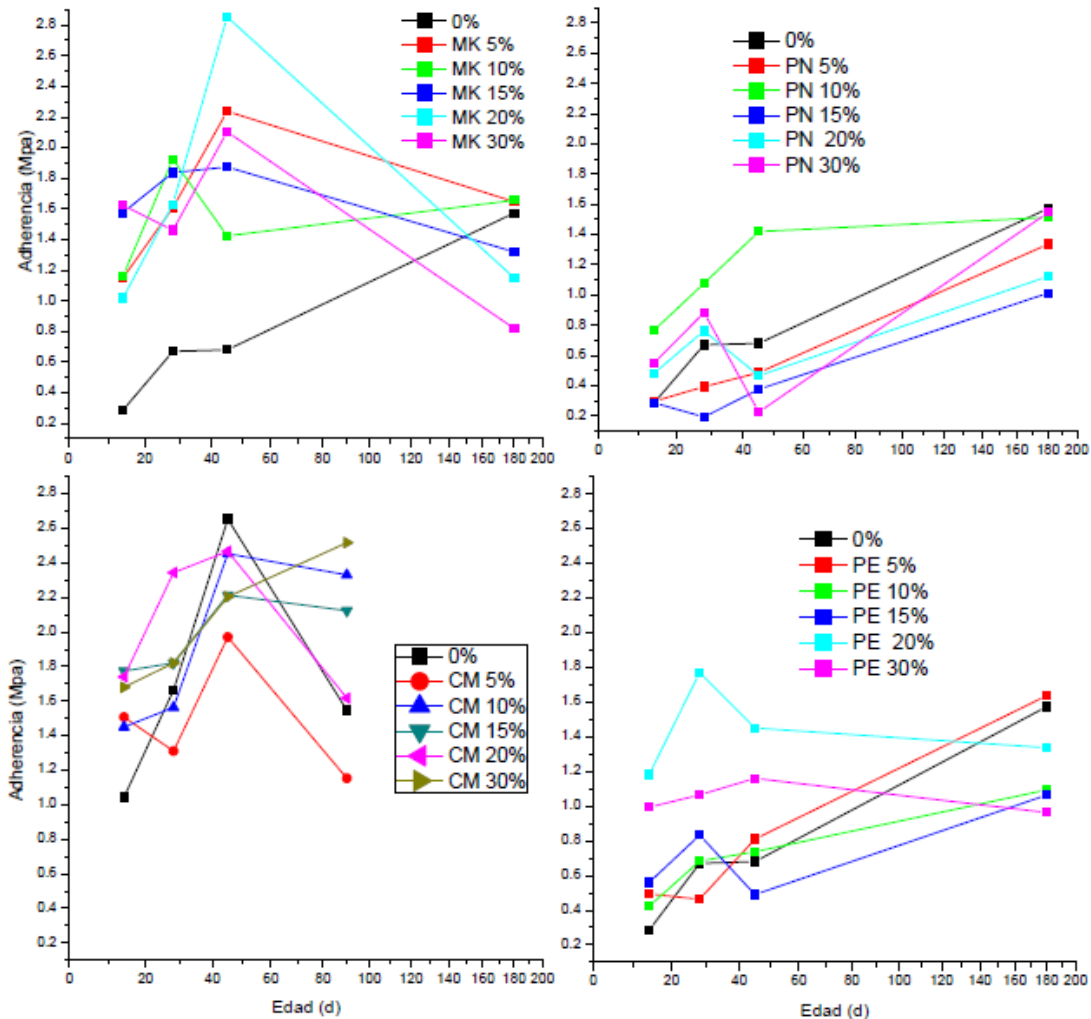
Gráfica 5-11. Comportamiento de la FN a tensión.

La gráfica 5-11 muestra el comportamiento de la FN a tensión, en general se tuvo un comportamiento similar al testigo con tres de sus porcentajes ligeramente por encima del testigo, siendo el FN 1 y 1.5% los que superan al testigo y también el 2% solo que aún falta de probar este porcentaje a 360 días de edad.

Mauricio Arreola Sánchez

### 5.2.4 Adherencia

#### Materiales de alta temperatura

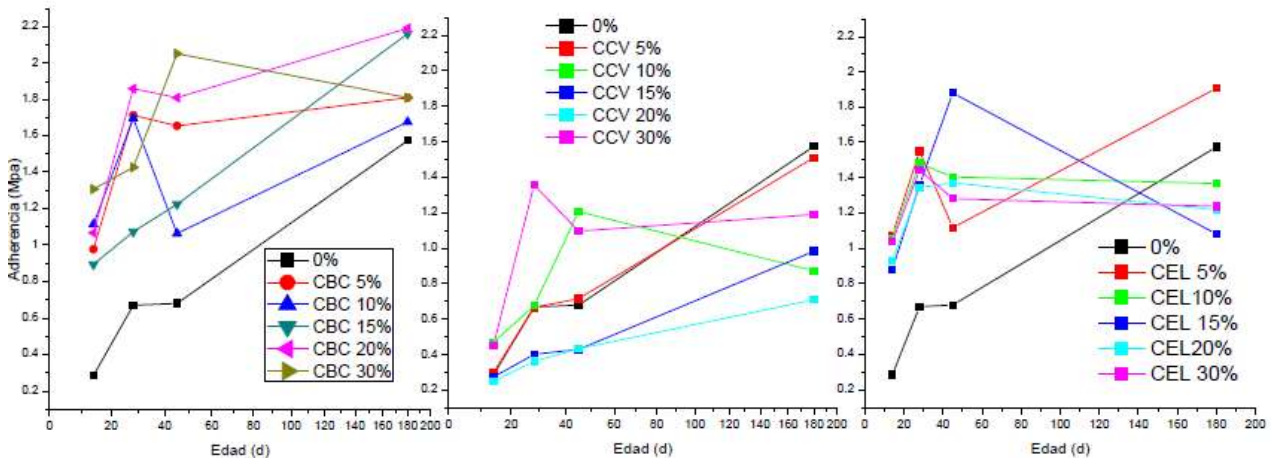


Gráfica 5-12. Esfuerzo de adherencia de materiales de alta temperatura.

En la gráfica 5-12 se muestran un comportamiento del MK descendente entre las edades de 45 y 180 días, salvo para el 10% que se mantiene por encima del testigo en las tres edades de prueba, y los únicos porcentajes que se mantienen ligeramente encima del testigo son el 5 y 10%; para el caso de PN y PE, muestran comportamientos similares entre sí, siendo los porcentajes de PE 5%, PN 10% y PN 30% resistieron prácticamente lo mismo que el testigo a la edad de 180 días; en el caso del CM son varios los porcentajes que superan el testigo a los 180 días de edad, de los cuales, los que mostraron mayor resistencia fueron el 10, 15 y 30%.

Mauricio Arreola Sánchez

### Cenizas orgánicas

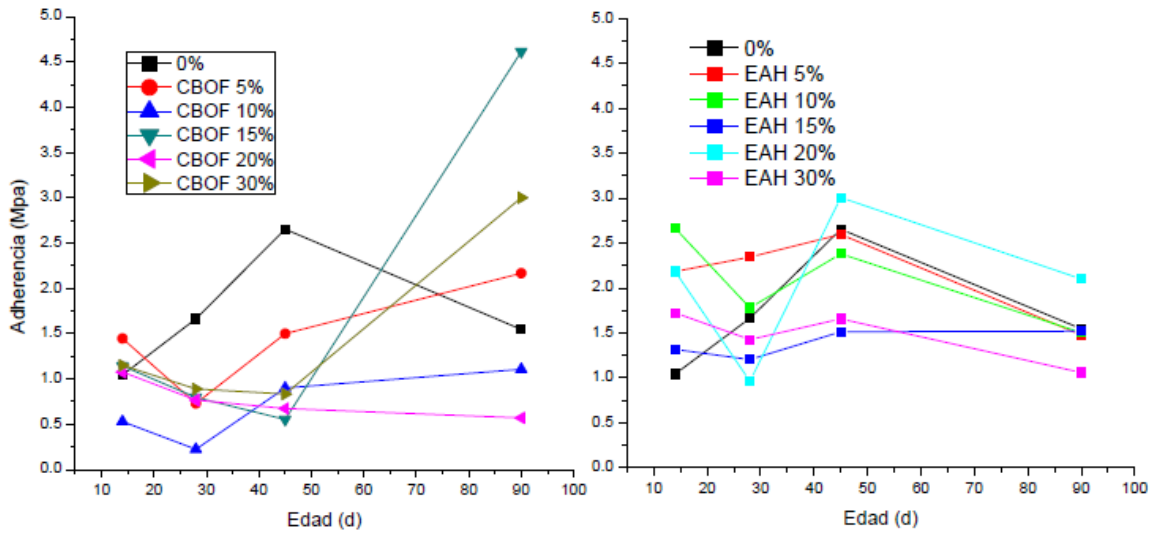


Gráfica 5-13. Esfuerzo de adherencia de cenizas orgánicas.

En el comportamiento de las cenizas en la sollicitación de adherencia (gráfica 5-13), se puede apreciar claramente que en las tres cenizas estudiadas al menos unos de sus porcentajes de sustitución tiene un comportamiento paralelo al testigo, por ejemplo el CEL 5% es la única sustitución de dicha ceniza que supera al testigo en todas las edades y su comportamiento es casi paralelo al mismo; también el CCV 5% se comporta de forma similar al testigo y las resistencias son prácticamente iguales y por último el CBC 20% también tiene un desempeño casi paralelo al testigo en todas la edades, además de que lo supera ampliamente en las resistencias.

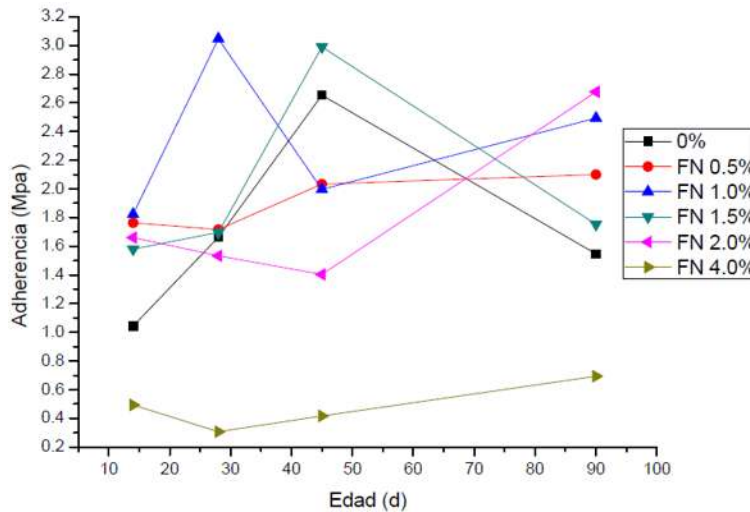
### Residuos industriales

La CBOF (gráfica 5-14) muestra un comportamiento general inferior al testigo en edades tempranas, más sin embargo la tendencia cambia a la edad de 180 días e incluso desde los 45 días para algunos de los porcentajes; caso contrario de la EAH que inicialmente su desempeño es superior al testigo en edades tempranas pero con una tendencia a la baja a partir de los 45 días. En ambos materiales, uno de los porcentajes con mejor comportamiento es el 15% de sustitución; además del 30% para la CBOF y del 20% para la EAH.



Gráfica 5-14. Esfuerzo de adherencia de residuos industriales.

Fibras orgánicas



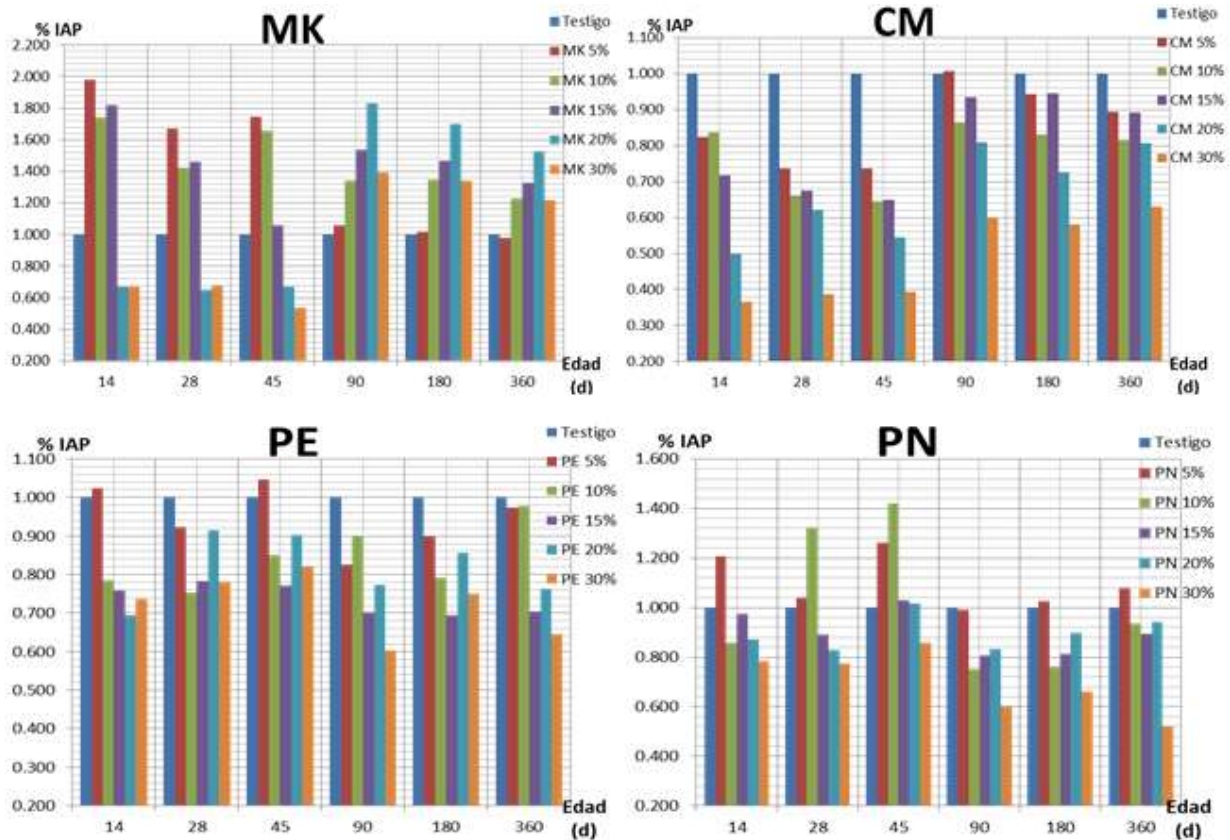
Gráfica 5-15. Esfuerzo de adherencia de la FN.

Al igual en el caso de la CBOF, la FN muestra una tendencia a la alza en casi todas las sustituciones (gráfica 5-14), cuatro de las cinco sustituciones superan al testigo en la edad de 180 días de los cuales se registró un mejor comportamiento de las sustituciones del 0.5 y 1%.



### 5.2.5 Índice de actividad puzolánica (IAP)

#### Materiales de alta temperatura

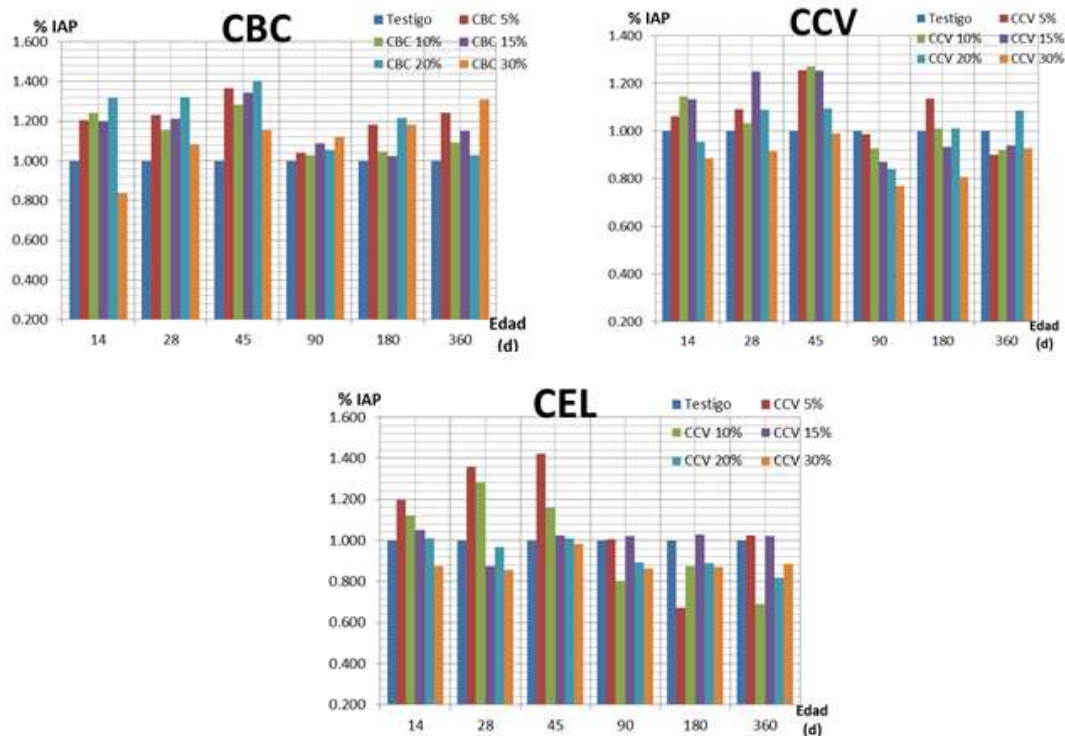


Gráfica 5-16. IAP de materiales de alta temperatura.

La gráfica 5-16 muestra el IAP de los cuatro materiales de alta temperatura, en la cual podemos observar que el MK tiene un alto IAP en los porcentajes de 5 al 15% en las edades tempranas, pero en las edades tardías dicho IAP decrece en esos porcentajes y aumenta para los porcentajes de 20 y 30%; para el caso del CM y de la PE el único porcentaje que se mantiene por encima del 70% de IAP es el 5% de sustitución a lo largo del tiempo; para la PN igualmente el porcentaje que se mantiene a lo largo del tiempo es el 5% de sustitución.



### Cenizas orgánicas



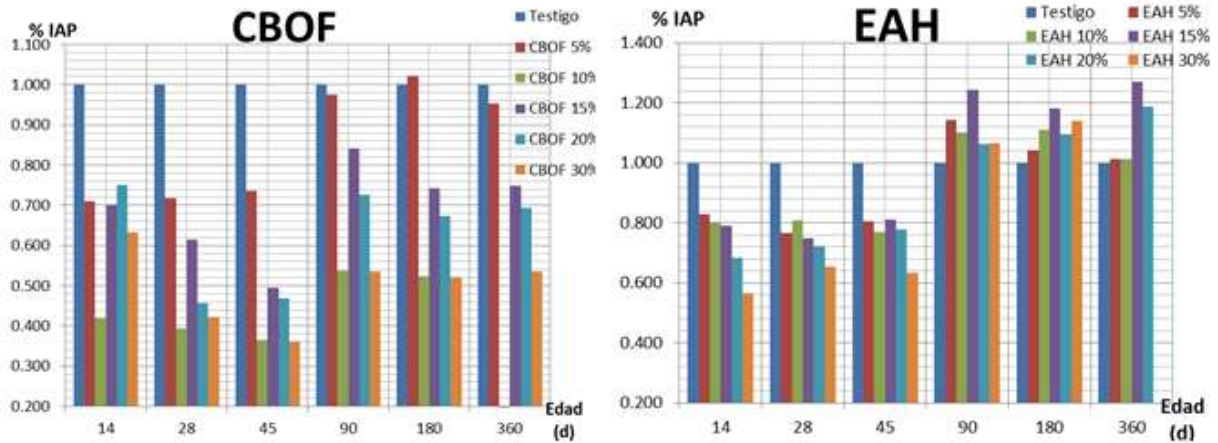
Gráfica 5-17. IAP de cenizas orgánicas.

El IAP para las tres cenizas orgánicas (gráfica 5-17) muestra el mismo comportamiento que el MK de la gráfica anterior, en las primeras edades se observa un AIP en todas las sustituciones de CCV y CBC y al incrementar la edad de las pruebas decrece el IAP en ambas cenizas, que dando solo lo porcentajes que realmente tienen reacciones puzolánicas por encima el testigo, siendo el 20% para CCV y todos los porcentajes para la CBC; en el caso de la CEL los porcentajes de 5 y 15% son los que tienen un IAP ligeramente superior al 100%.

### Residuos industriales

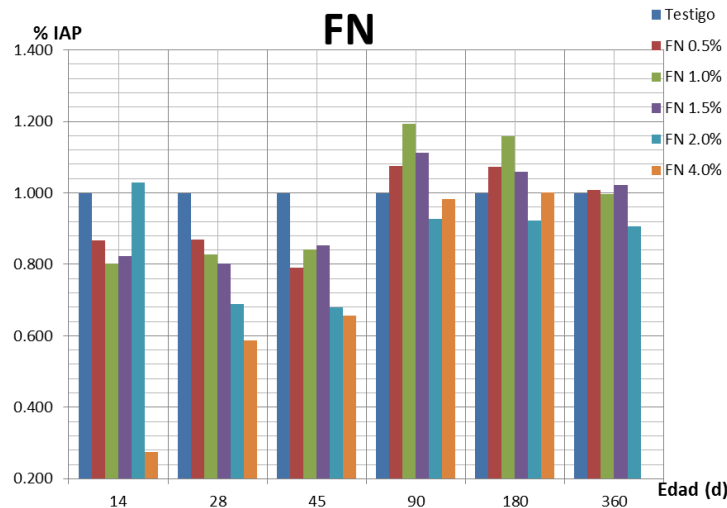
El IAP del CBOF y de la EAH se comportan según lo esperado (gráfica 5-18), ya que en las edades tempranas se tiene un IAP bajo y va incrementándose a medida que se incrementan la edad del espécimen, notándose un incremento brusco en la edad 90 días que es cuando generalmente se da la reacción puzolánica. Para la CBOF el porcentaje con mejor comportamiento es el 5% y para la EAH son el 15 y 20%.

Mauricio Arreola Sánchez



Gráfica 5-18. IAP de residuos industriales.

Fibras orgánicas



Gráfica 5-19. IAP de la FN.

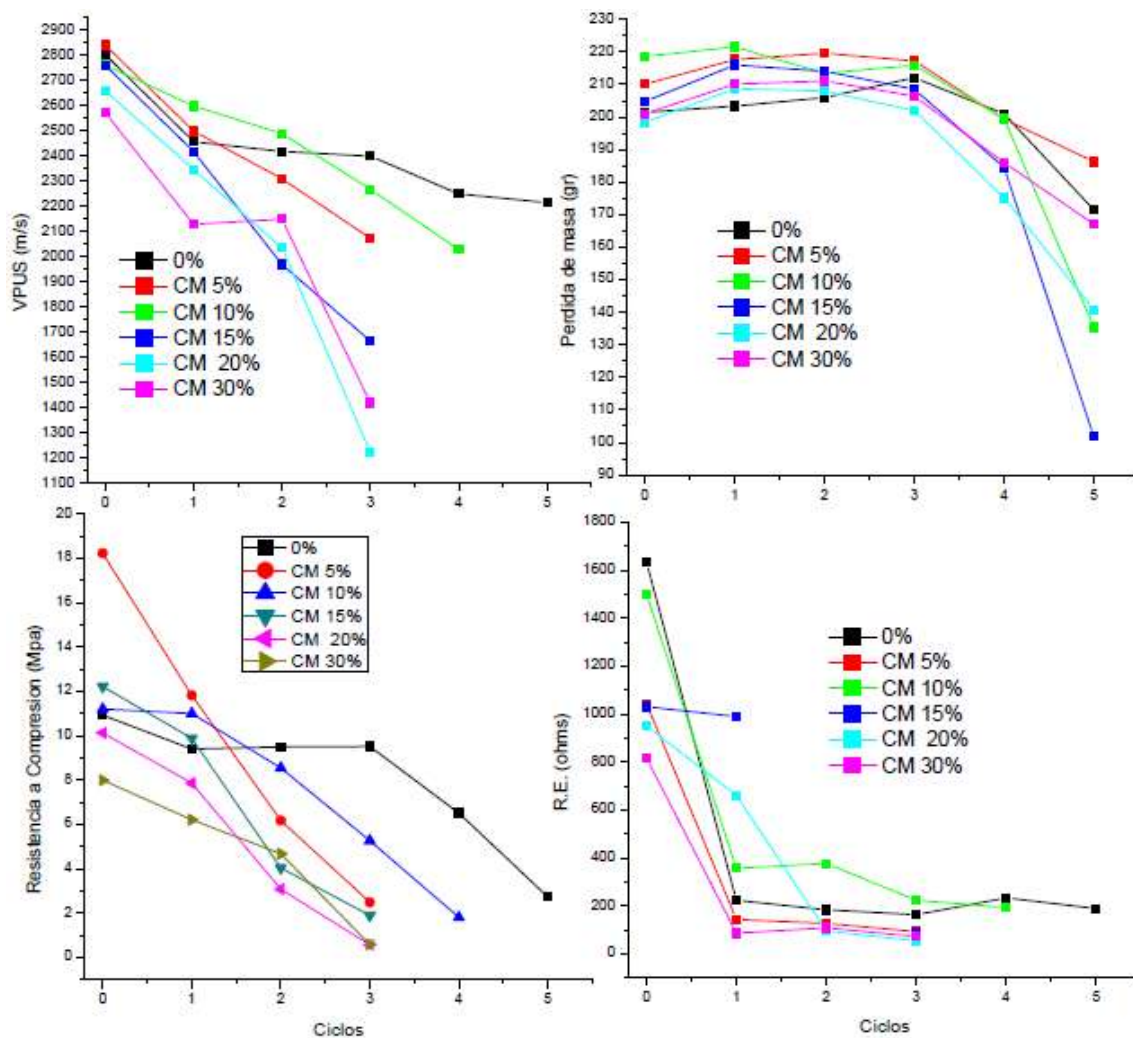
Al igual que los residuos industriales, la FN (gráfica 5-19) muestra un comportamiento del IAP constante con un incremento brusco a los 90 días de edad, para la FN los porcentajes de 0.5, 1 y 1.5, los cuales muestran un IAP del 100% a los 360 días.

### 5.3 Prueba de ataque por sulfatos

Como ya se explicó en el capítulo 2, la prueba de ataque por sulfatos nos permite medir la durabilidad y/o la estabilidad de un material ante el contacto con agentes químicos. Para el presente estudio la prueba se realizó a la edad de 90 días y para este caso solo se realizó un testigo, el de arena de Huajúbaro, esto dado que la prueba solo mide la durabilidad del mortero no sus características mecánicas y ambos morteros testigo se elaboraron con el mismo tipo de cemento.

#### 5.3.1 Materiales de alta temperatura

##### Carbón Mineral (CM)

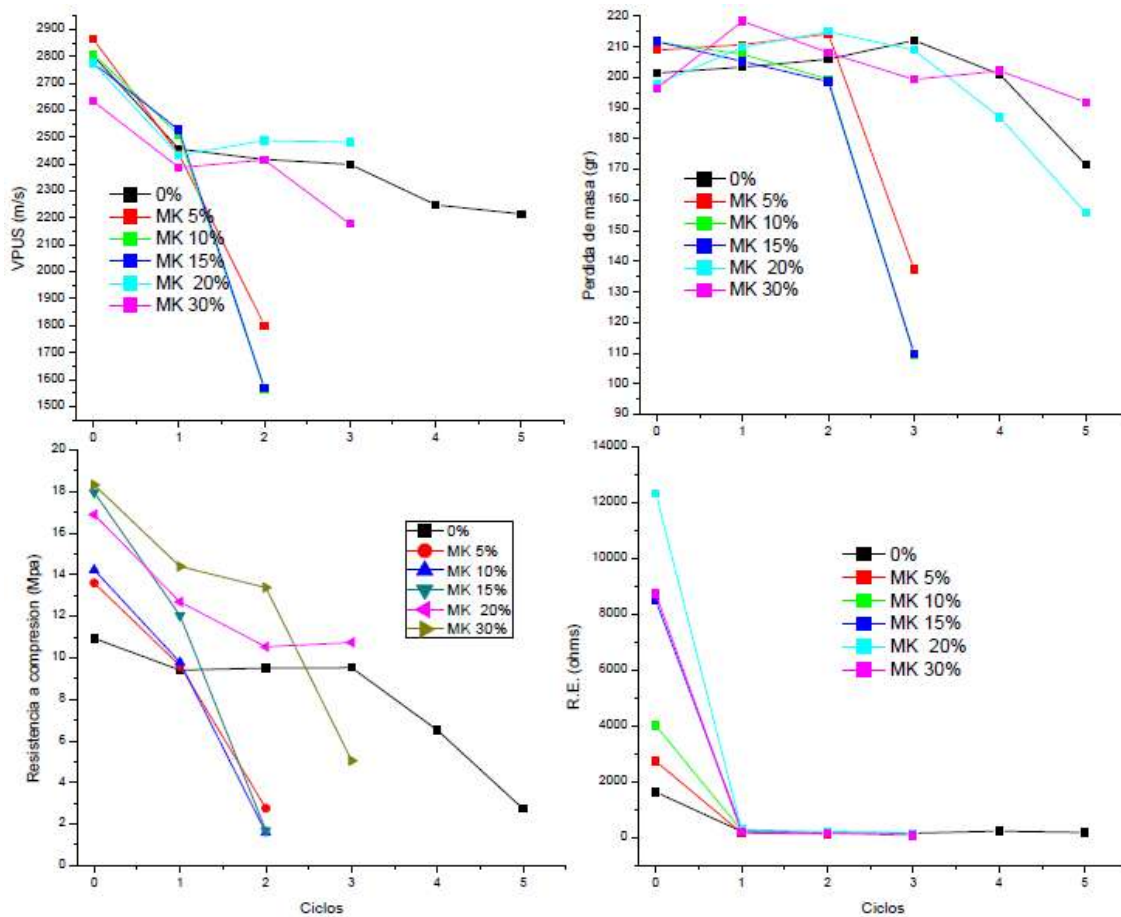


Gráfica 5-20. Ataque por sulfatos de CM.

Mauricio Arreola Sánchez

La gráfica 5-20 muestra los resultados de la prueba de ataque por sales de sulfatos de sodio al CM, las pruebas que se realizaron a los especímenes durante los ataques por sulfatos fueron carga axial, velocidad de pulso ultrasónico, y resistencia eléctrica así como el registro de la pérdida de masa que la misma prueba de durabilidad indica. El porcentaje que mejor se comportó fue el 10% ya que es el único que llegó hasta el 4 ciclo de ataque y su pérdida de resistencia menos fuerte que el restos de sustituciones aunque más rápida que el testigo.

**Metacaolín (MK)**



Gráfica 5-21. Ataque por sulfatos del MK.

Como se puede observar en la gráfica 5-21, el porcentaje con el mejor desempeño es el MK 20% aunque solo se pudo probar a carga axial hasta el tercer ciclo, debió a que los especímenes (cubos) perdieron sus aristas y esto no permitió probarlos a carga axial (imagen 5-4), pero los especímenes mostraron buenas características una vez terminada la

*Mauricio Arreola Sánchez*

prueba de durabilidad. En la gráfica 5-21 se aprecia que el MK 20% está por encima del testigo en compresión y en VPUS y en pérdida de masa está ligeramente inferior al testigo.

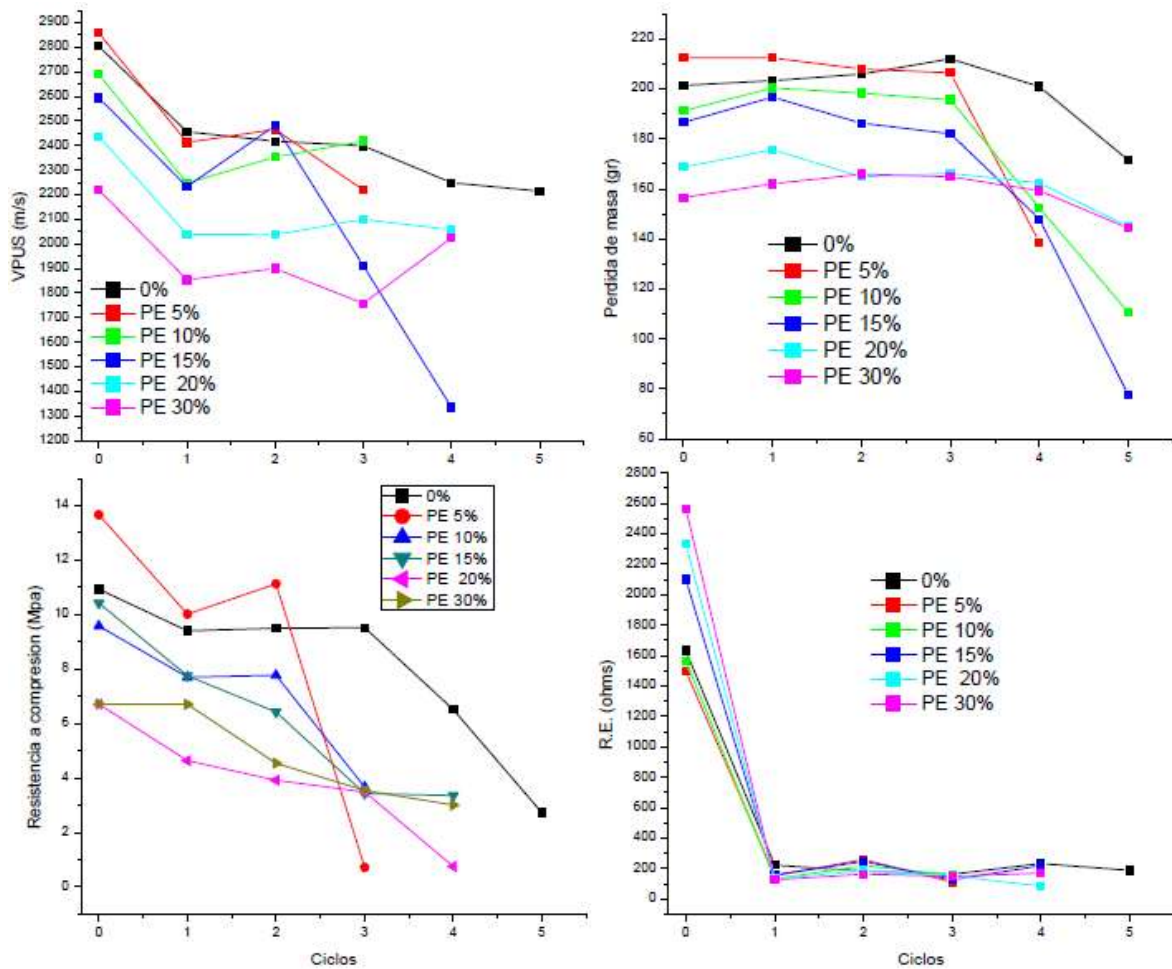


Imagen 5-5. MK 20 y 30% después del quinto ataque por sales de sulfatos de sodio.

### **Perlita expandida (PE)**

Los porcentajes que mejor se comportan ante los ataques son el 15 y 30% desde el punto de vista mecánico, aunque ya en los resultados de comportamiento mecánico los que se comportaron mejor fueron el 5 y 10%. En la prueba de durabilidad ni mostraron el mismo desempeño, ya que según lo observado en la gráfica 5-22, los porcentajes con mayor estabilidad en pérdida de masa y VPUS fueron el 20 y 30% solo que estos porcentajes no lograron desarrollar sus propiedades mecánicas en la misma cantidad que el testigo, es por esto que aparecen siempre por debajo del mismo.

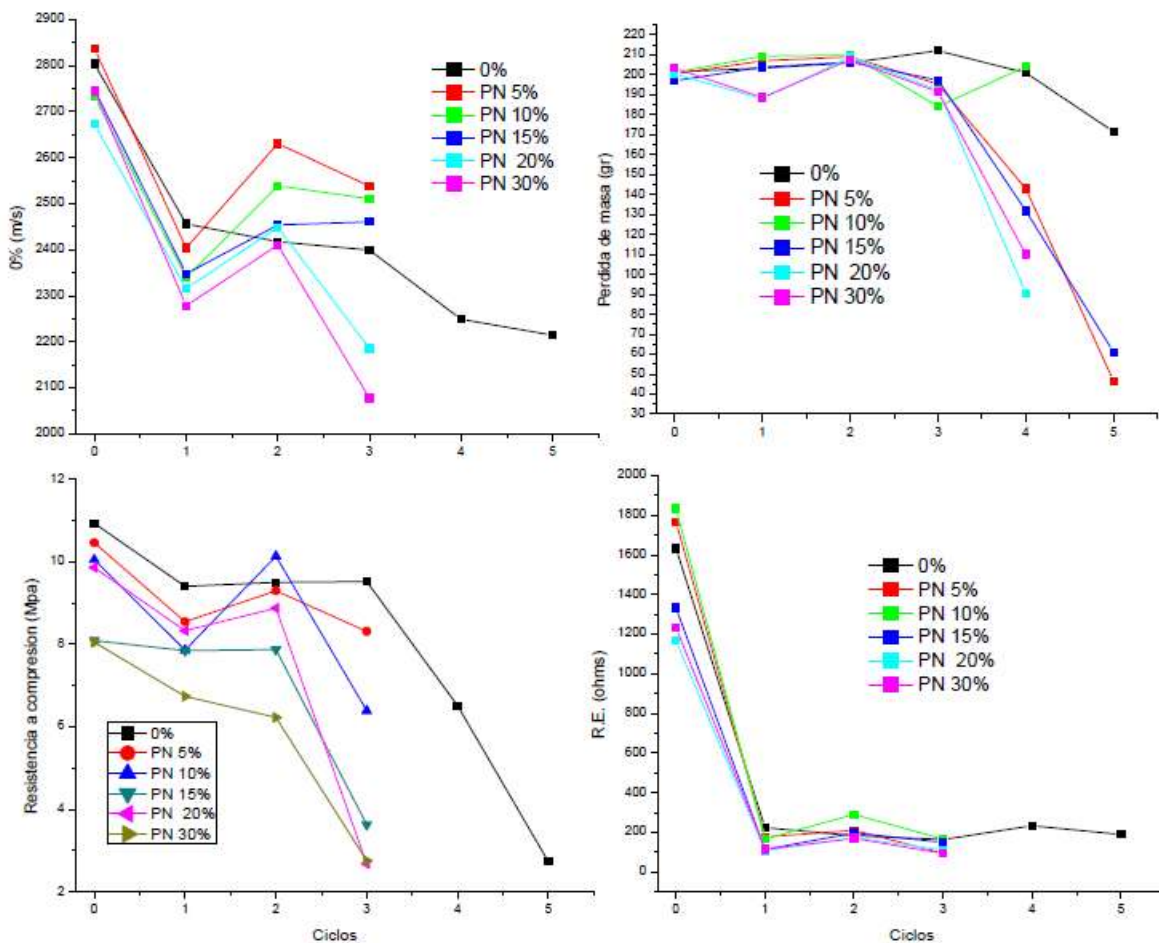




Gráfica 5-22. Ataque por sulfatos de la PE.

### Perlita Natural (PN)

La PN mostro un desempeño aún menor que la PE, ya que la PN solo soporto hasta el tercer ciclo de la prueba (gráfica 5-23). El único porcentaje que mostro un desempeño a carga axial ligeramente inferior al testigo fue el 5% pero, al igual que las cinco sustituciones, solo soporto hasta el tercer ciclo lo que denota un poco durabilidad de dicho material al ataque químico.



Gráfica 5-23. Ataque por sulfatos de la PN.

### 5.3.2 Cenizas orgánicas

Una peculiaridad de las cenizas orgánicas durante el ataque por sulfato de sodio, fue la forma que se presentó la pérdida de masa, ya que para el caso de la CCV aparentemente el efecto de degradación fue más fuerte en la parte interna de los especímenes, mientras que en la superficie externa mostro una mayor estabilidad (imagen 5-6). Caso contrario ocurrió con las CBC, ya que esta ceniza fue afectada inicialmente desde la parte superficial y la pérdida de masa fue gradual hasta quedar el espécimen en forma esférica; este último comportamiento fue el que se presentó en la mayoría de los materiales sustitutos analizados.





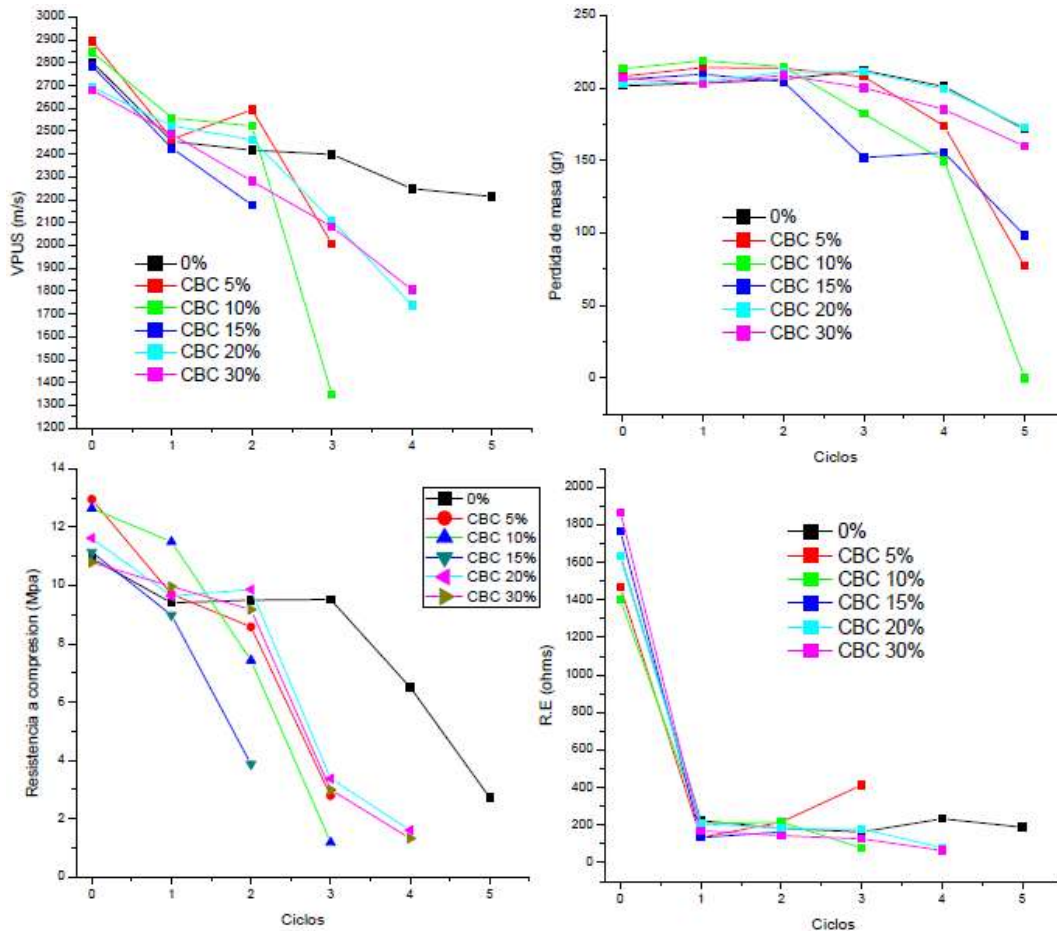
Imagen 5-6. Pérdida de masa de cenizas orgánicas.

### **Ceniza de Bagazo de Caña (CBC)**

Como se puede ver en la gráfica 5-24, los porcentajes que mostraron mayor resistencia al ataque por sulfatos fueron el 20 y 30%, ya estos porcentajes lograron llegar hasta el 4 ciclo en la resistencia mecánica, además de mostrar un comportamiento más estable en la VPUS y la pérdida de masa es igual a la del testigo para el 20% y ligeramente inferior para el 30%; lo que nos deja como porcentaje optimo el CBC 20%.

Cabe mencionar que aunque el 20 y 30% de sustitución, fueron los porcentajes que desarrollaron las mejores características tanto en comportamiento mecánico como la prueba de durabilidad; también presentaron fuertes cambios de volumen durante los ataques por sulfato de sodio (imagen 5-7), aspecto que tendría que ser analizado en investigaciones futuras.

*Mauricio Arreola Sánchez*



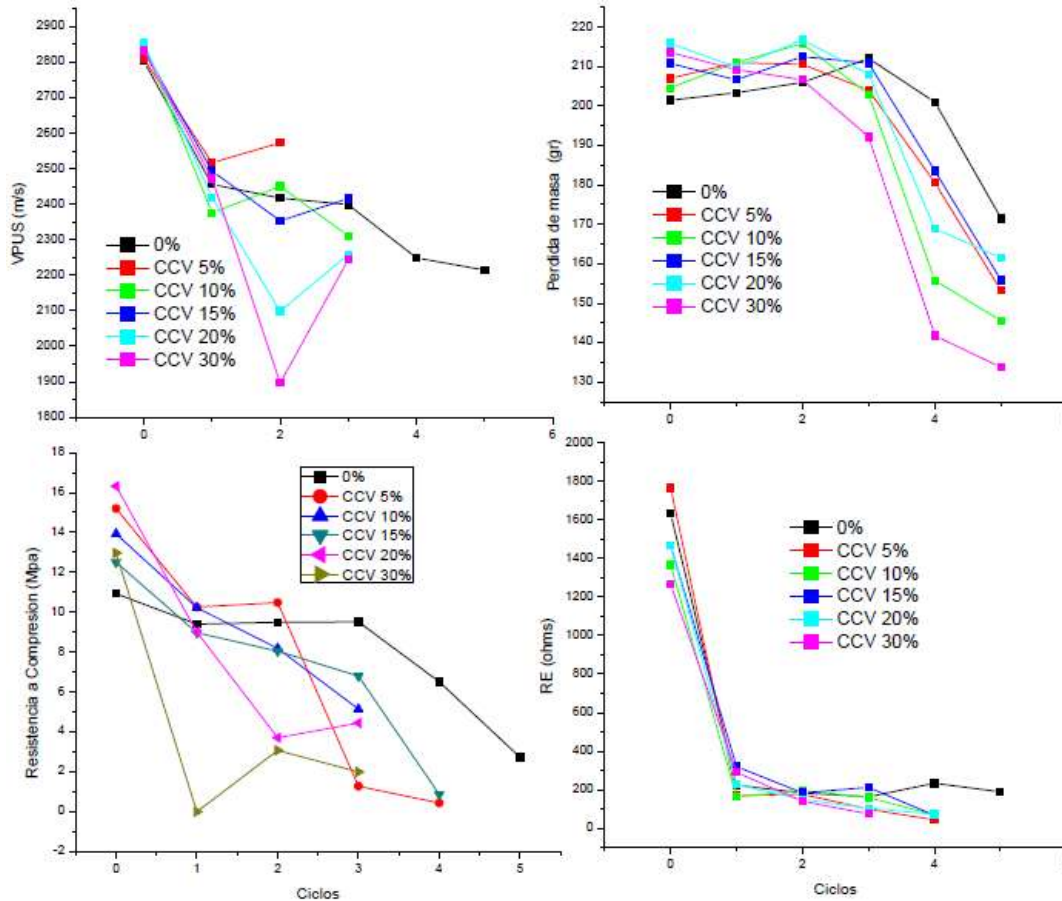
Gráfica 5-24. Ataque por sulfatos de la CBC.



Imagen 5-7. Cambios de volumen de la CBC.

Mauricio Arreola Sánchez

**Ceniza de carbón vegetal (CCV)**

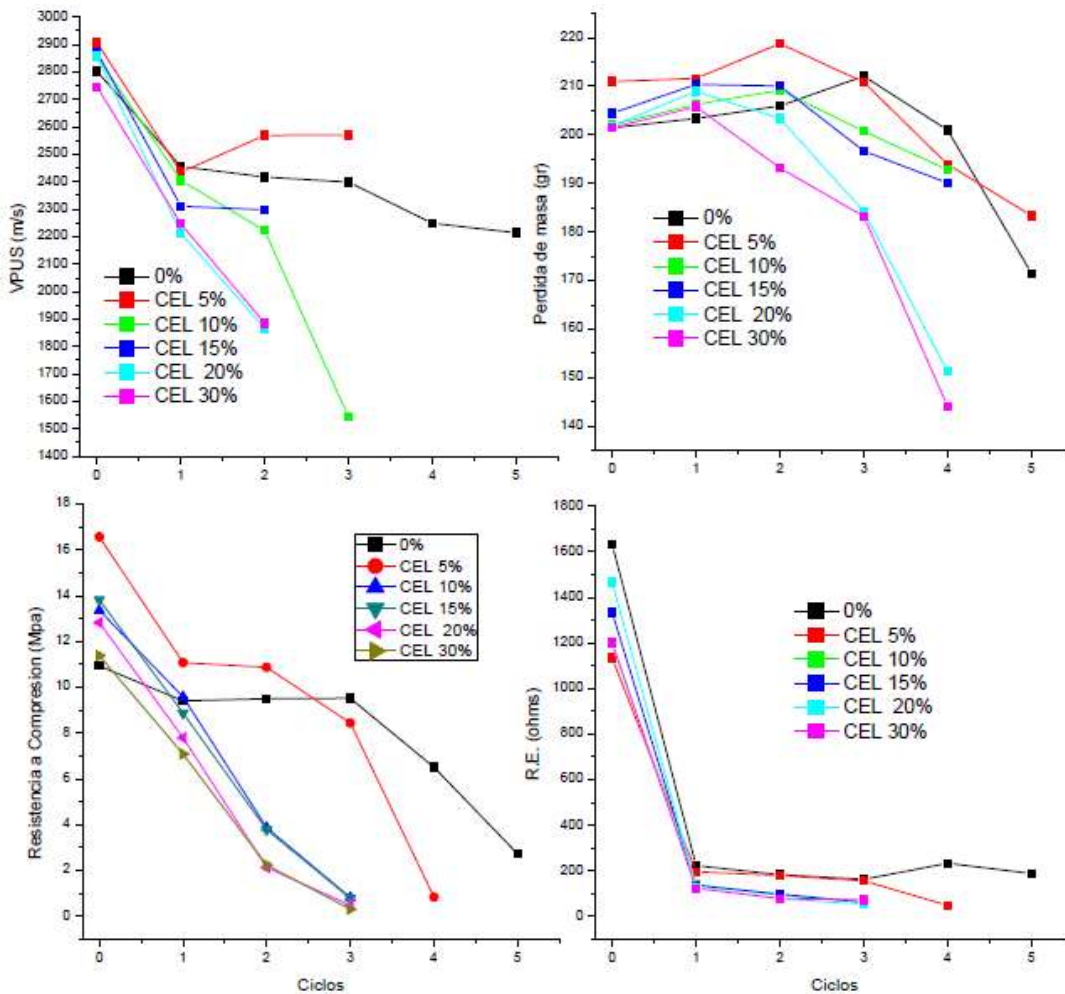


**Gráfica 5-25. Ataque por sulfatos de la CCV.**

Para el caso de la CCV, el porcentaje con el mejor desempeño es el 15% (gráfica 5-25), ya que soporta hasta el cuarto ciclo y con un comportamiento paralelo al testigo, solo separándose de forma más evidente en el cuarto ciclo; en la pérdida de masa también muestra una estabilidad muy cercana al testigo, siendo este porcentaje el que registro la menor pérdida de masa durante los cinco ciclos.

**Ceniza de elaboración de ladrillo (CEL)**

Para esta ceniza, el mejor comportamiento fue del 5% de sustitución (gráfica 2-26), ya fue el que soporta la mayor cantidad de ataques y mostro un comportamiento similar al testigo en las pruebas de carga axial, VPUS y perdida de masa.



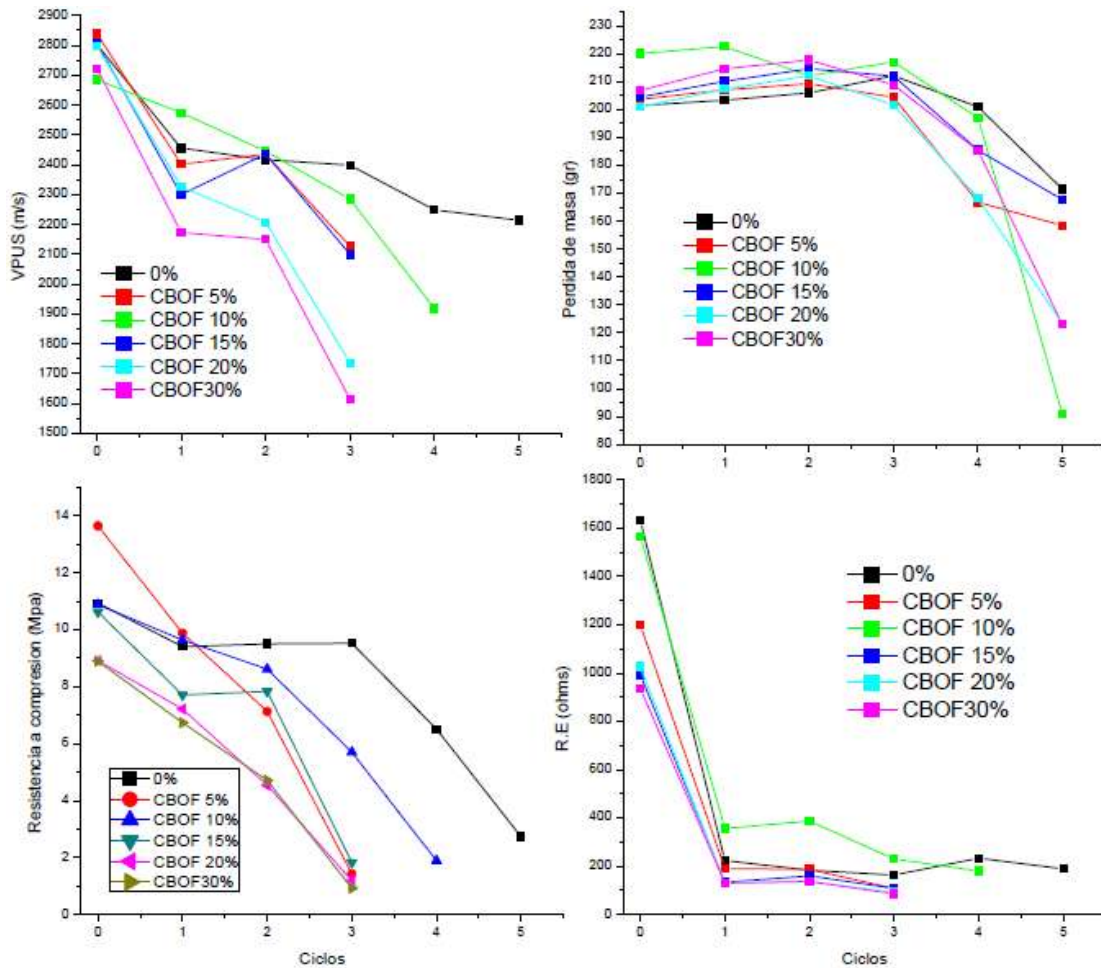
Gráfica 5-26. Ataque por sulfatos de la CEL.

### 5.3.3 Residuos industriales

#### Ceniza de horno de BOF "blast oxygen furnace" (CBOF)

Como se puede apreciar en la gráfica 5-27, el CBOF 15% fue la mezcla con el mejor comportamiento tanto mecánicamente como en pérdida de masa, logrando mostrar resistencia hasta el cuarto ciclo, aunque su caída de resistencia es más fuerte que la del testigo; en general este material mostro una pérdida de masa similar al testigo en todos sus porcentajes de sustitución.



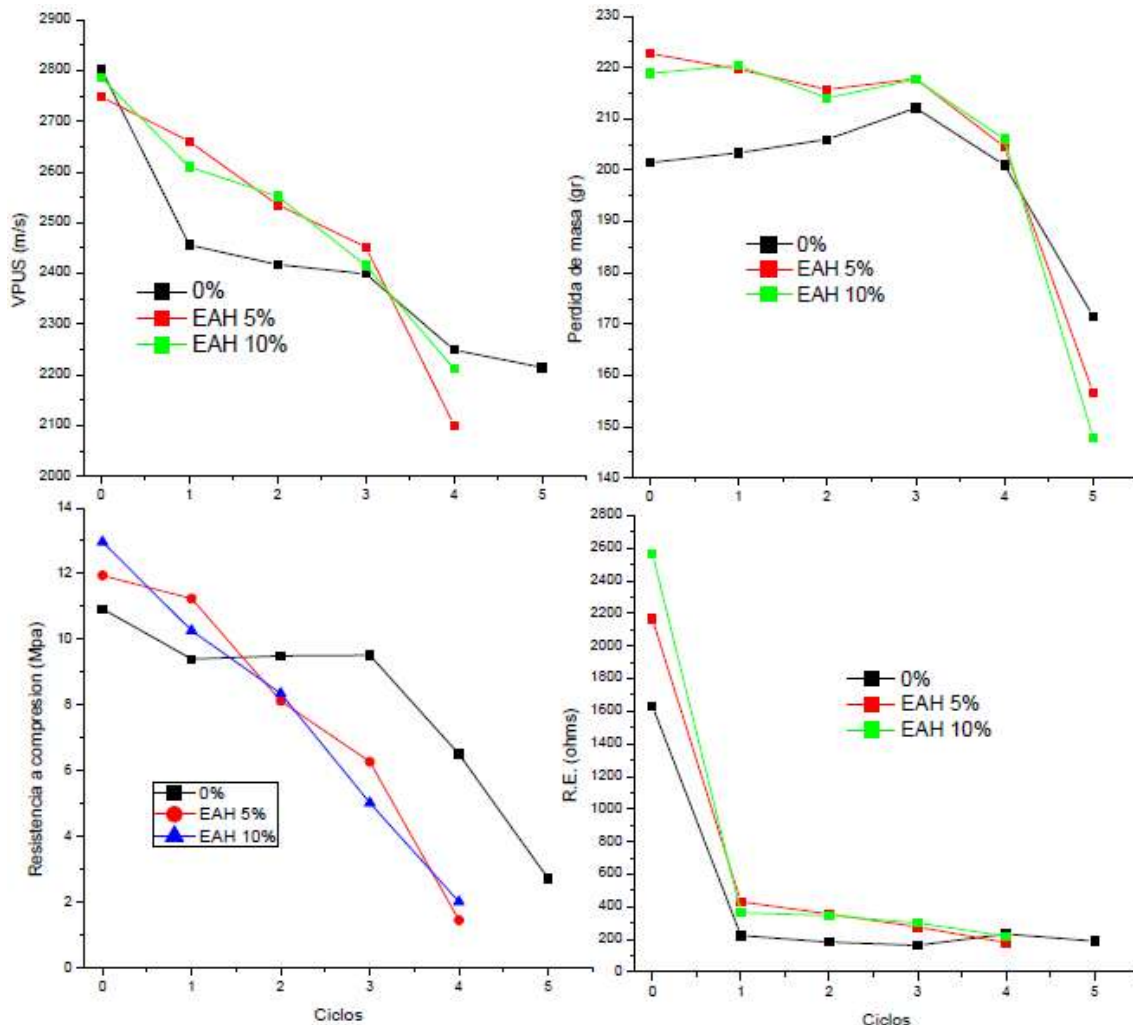


Gráfica 5-27. Ataque por sulfatos de CBOF.

### Escoria de alto Horno (EAH)

Para la EAH, por cuestiones de disponibilidad de material, solo se pudo someter a la prueba de durabilidad los porcentajes de 5 y 10. En la gráfica 5-28 se puede apreciar que el comportamiento de estos dos porcentajes es bastante aceptable, ya que aunque la pérdida de resistencia es más pronunciada que el testigo, muestran mayor VPUS y menor pérdida de masa hasta el cuarto ciclo.

Pero para poder determinar el porcentaje de mejor desempeño a durabilidad, faltaría someter a esta prueba a los porcentajes de 15 y 20% que fueron los que presentaron el mejor desempeño en las sollicitaciones mecánicas, y por ende se esperaría una mayor durabilidad de los mismos.

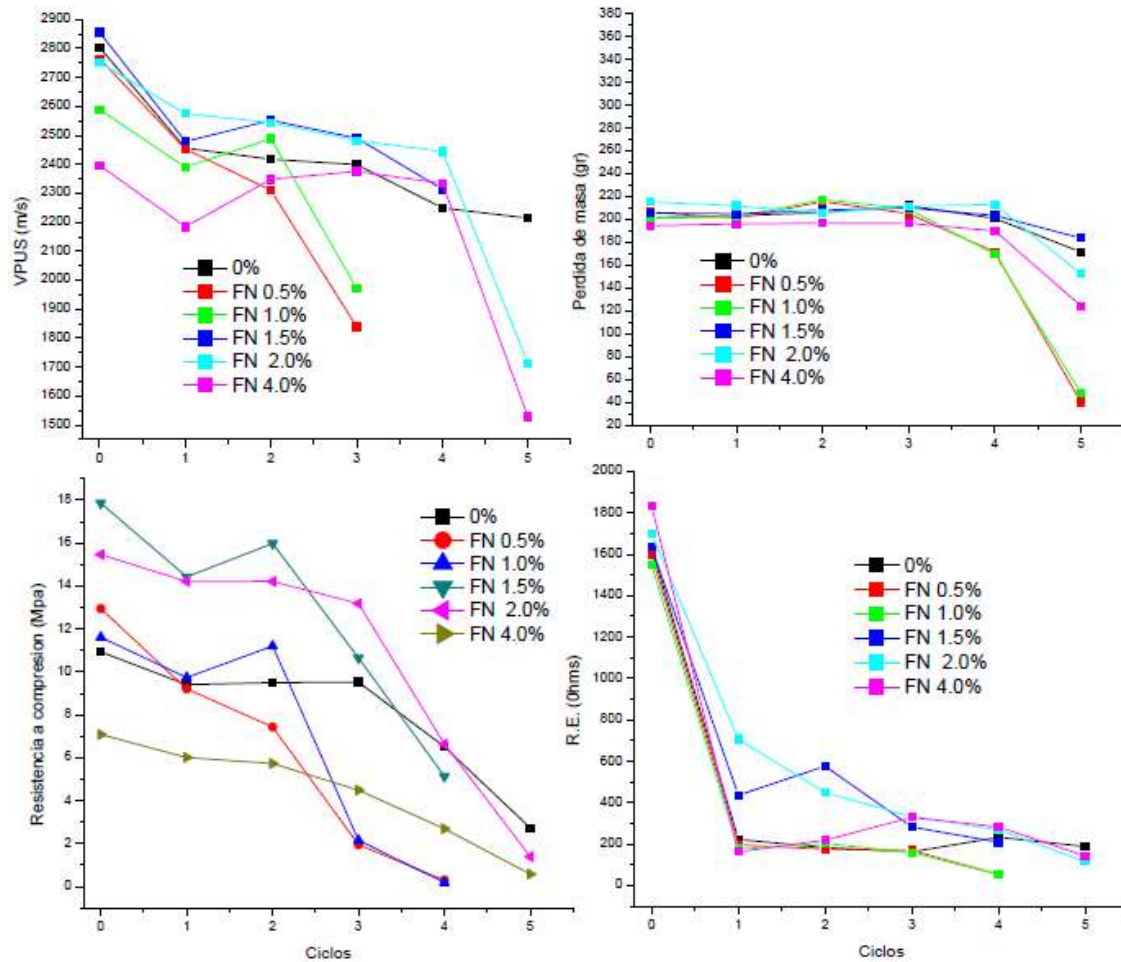


Gráfica 5-28. Ataque por sulfatos para la EAH.

### 5.3.4 Fibras orgánicas

#### Fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco (FN)

Como se puede corroborar en la gráfica 5-29, la FN ha sido el material con el mejor desempeño en la prueba de durabilidad, ya que en dos de sus porcentajes, FN 1.5 y FN 2%, logra superar el comportamiento del testigo en las cuatro pruebas analizadas durante los ataques de sulfatos de sodio; registrando pérdidas de R.E. menores que el testigo, cosa que solamente la FN en dos porcentajes y la CBOF en uno lograron mejorar.



Gráfica 5-29. Ataque por sulfatos de la FN.

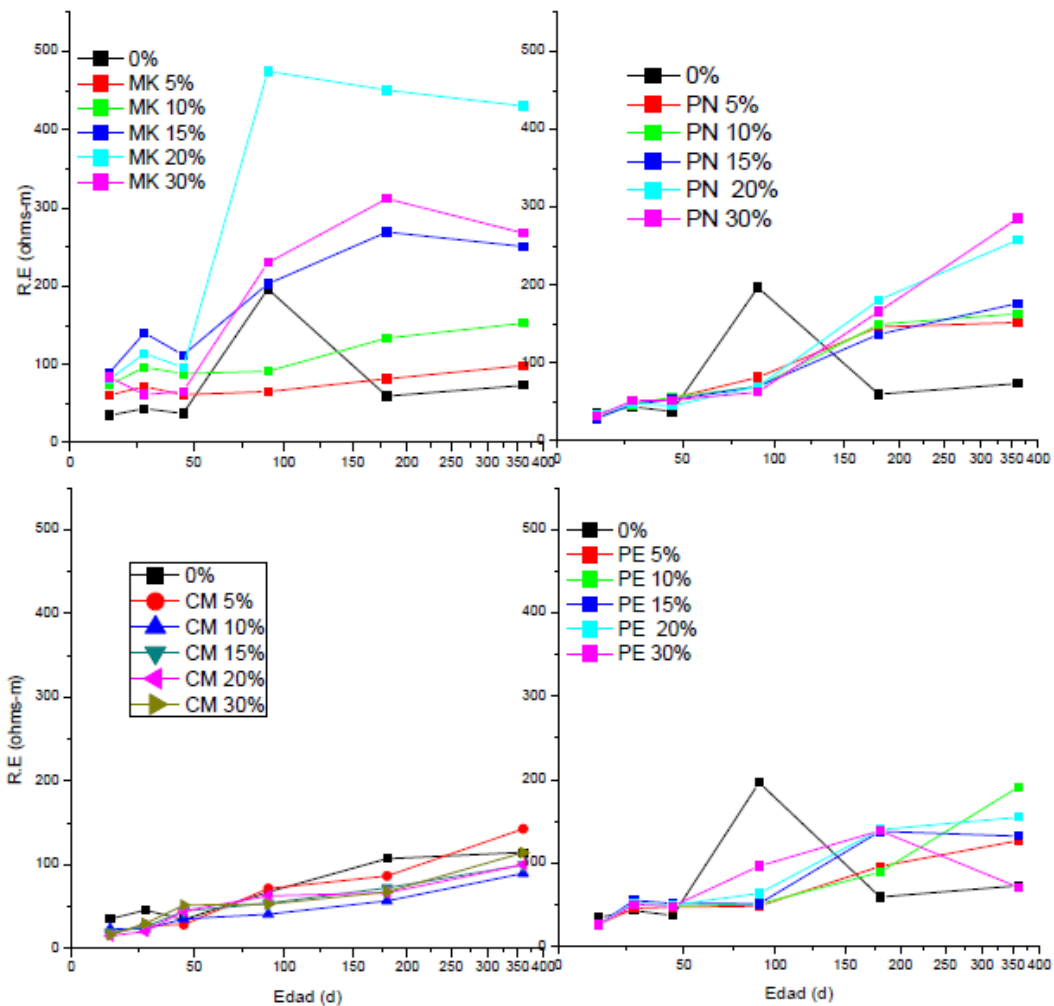
Como se pudo observar en prácticamente los diez materiales de estudio (salvo algunos porcentajes de FN y CBOF), la pérdida de R.E. su súbita en el primer ciclo y se mantiene igual en el resto de los ciclos, esto se debe a que la R.E. está fuertemente influenciada por la conductividad de los iones presentes en los poros de la matriz del mortero. Y por ende, una vez que dichos poros son llenados por la solución de sulfato de sodio, la conductividad del medio se dispara súbitamente y posteriormente se mantiene estable debido a que se está midiendo la conductividad del sulfato de sodio.

## 5.4 Pruebas no destructivas

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, las pruebas no destructivas desarrolladas en la presente investigación fueron cuatro: Velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, porosidad total y densidad.



### 5.4.1 Resistividad eléctrica Materiales de alta temperatura

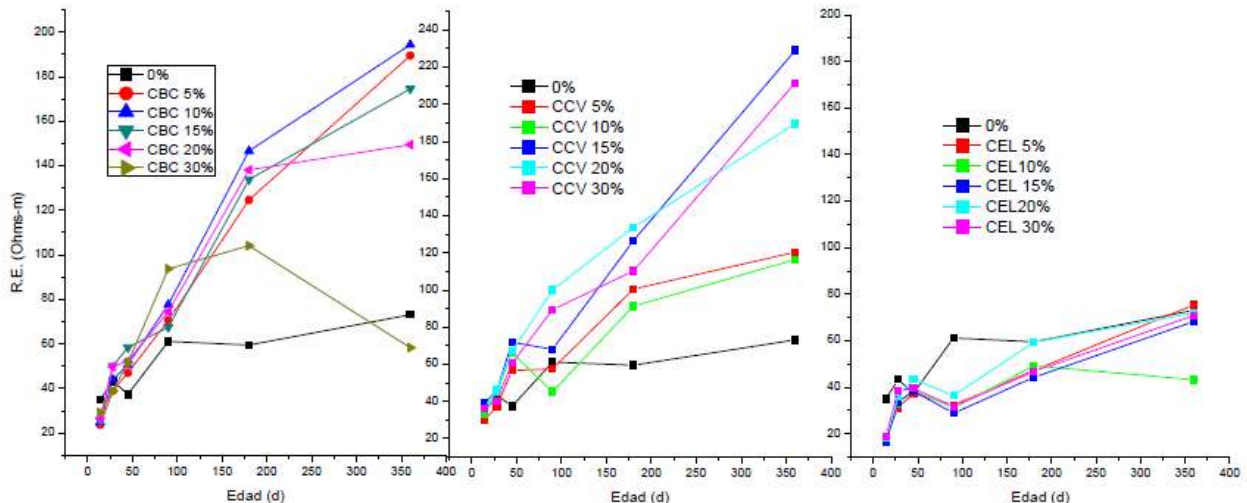


Gráfica 5-30. R.E. de materiales de alta temperatura.

Dentro de los materiales de alta temperatura el MK es el que muestra el mejor comportamiento (gráfica 5-30), con tres de sus sustituciones por encima del testigo, siendo el MK 20 el que muestra la resistividad más alta; para el caso de la PE y PN, ambos muestran una tendencia a la alza conforme se incrementa la edad, aunque la PN tiene un pendiente mayor que la PE, sus mejores porcentajes son el 20 y 30% para PN y el 10% para PE; En el caso del CM muestra una tendencia generalizada ligeramente inferior al testigo, superándolo solo el 5% a los 360 días pero el resto de sus sustituciones lo alcanzan a la misma edad.

Mauricio Arreola Sánchez

### Cenizas orgánicas

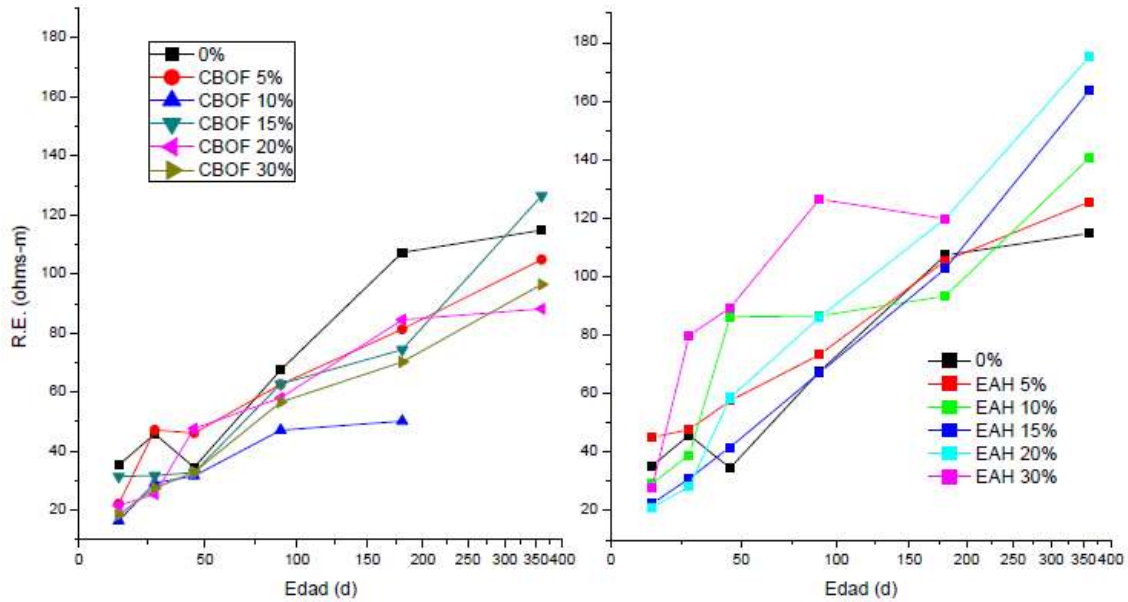


Gráfica 5-31. R.E. de cenizas orgánicas.

En la gráfica 5-31 se puede comprobar que el mejor comportamiento lo tiene la CCV ya que todos sus porcentajes superan al testigo a partir de la edad de 45 días, siendo el CCV 15, 20 y 30% los de mejores resultados; la CBC tiene un comportamiento similar a la CCV, con cuatro de sus porcentajes muy por encima del testigo (CBC 5-20%), siendo el CBC 10% el que alcanzo la mayor RE aunque su valor es un poco menor al de CCV 15%; en el caso de la CEL se observa un comportamiento inferior al testigo en prácticamente en todos los porcentajes y en casi todas la edades, logrando al cansarlo hasta la edad de 360 días.

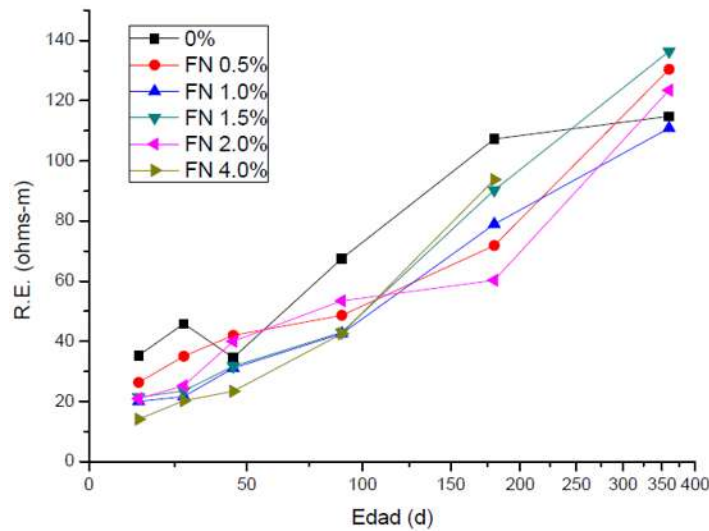
### Residuos industriales

En la gráfica 5-32, se aprecia como los dos materiales muestran comportamientos opuestos entre sí, el CBOF tiene una tendencia generalizada inferior al testigo y solo el 15% de sustitución logra superarlo a la edad de 360 días; mientras que la EAH tiene una tendencia generalizada por encima del testigo, siendo los porcentajes de 15 y 20% de sustitución los que registran la mayor resistividad y una más pronunciada a la alza con respecto a la edad de prueba.



Gráfica 5-32. R.E. de residuos industriales.

### Fibras naturales



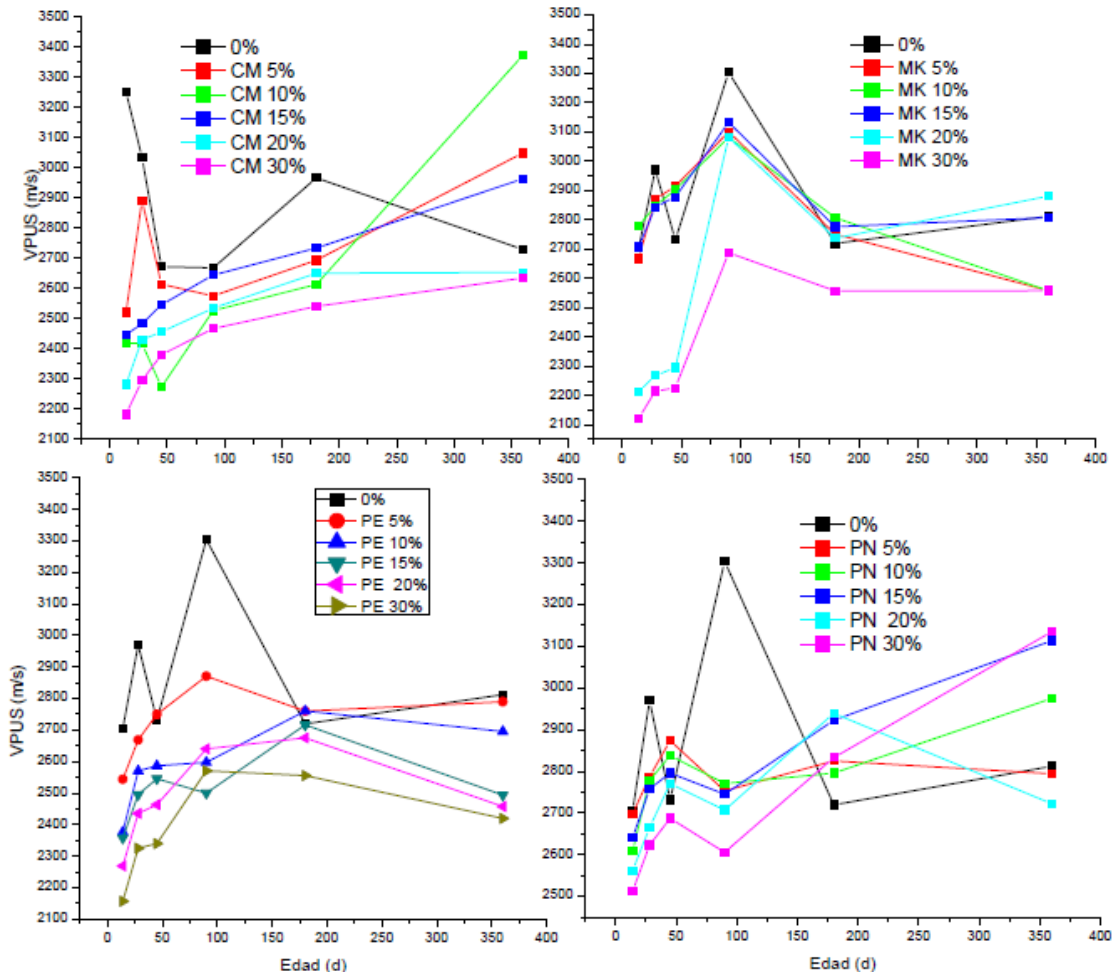
Gráfica 5-33. R.E. de la FN.

Al igual que la CBOF, la FN muestra un comportamiento generalizado menor al testigo (gráfica 5-33) solo que la FN presenta una tendencia a la alza más pronunciada, logrando superar al testigo a la edad de 360 días, siendo el FN 1.5% la mezcla con mayor resistividad.

Mauricio Arreola Sánchez

### 5.4.2 Velocidad de pulso ultrasónico (VPUS)

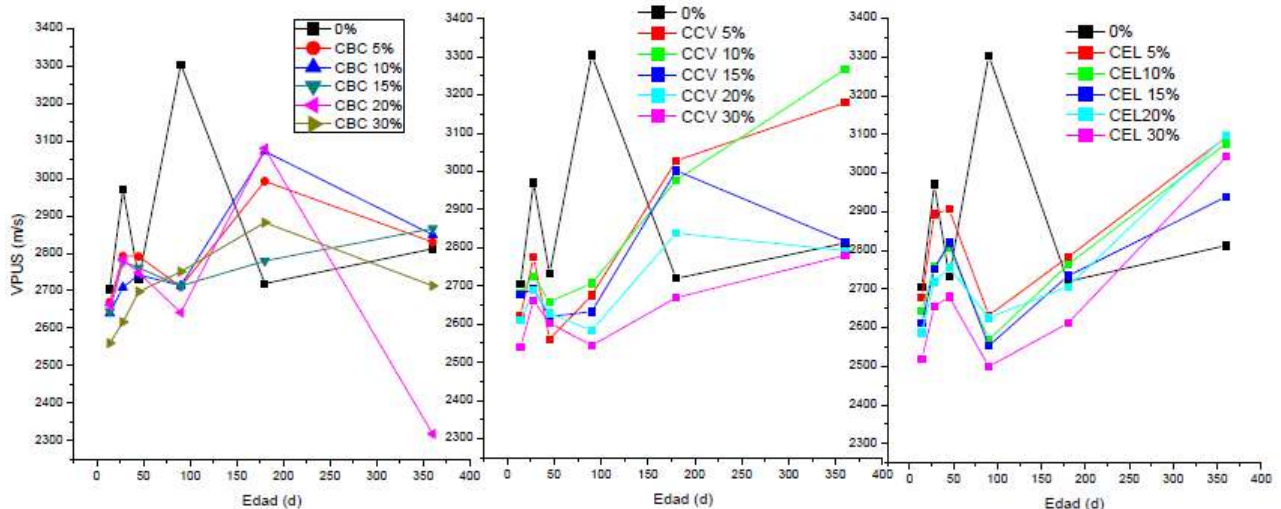
#### Materiales de alta temperatura



Gráfica 5-34. VPUS de materiales de alta temperatura.

Como se puede observar en la gráficas 5-34, solo la PN logra desarrollar un comportamiento similar al testigo en todas sus sustituciones, logrando superarlo a partir de la edad de 180 días, siendo el 15 y 30% los que logran una VPUS mayor; también el MK muestra un comportamiento similar al testigo y una menor variabilidad de resultados, siendo el 15 y 20% los porcentajes con el mejor desempeño; para el caso de la PE y el CM, ambos muestran un comportamiento generalizado por debajo del testigo, solo que para el CM tres de sus porcentajes logra superarlo a la edad de 360 días, siendo el CM 15% el que muestra un comportamiento más estable; mientras que para la PE solo el 5% logra igualar al testigo a la misma edad.

### Cenizas orgánicas

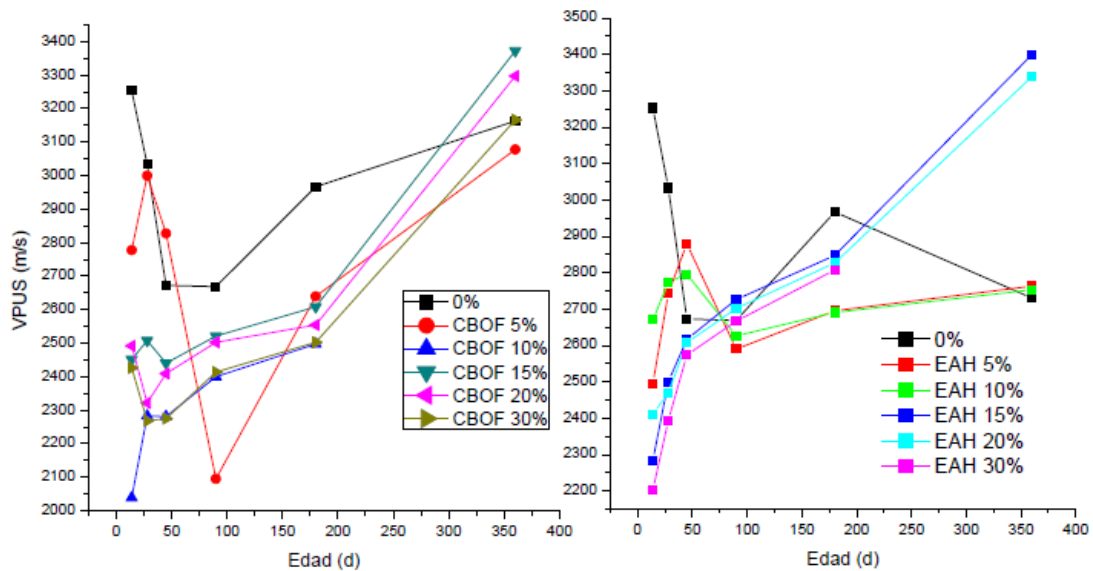


Gráfica 5-35. VPUS de cenizas orgánicas.

Como se muestra en la gráfica 5-35, las tres cenizas orgánicas muestran un comportamiento muy semejante entre sí, siendo la CCV la que logra VPUS en sus porcentajes de 5 y 10; mientras que la CBC solo logra igualar al testigo a la edad de 360 días; y la CEL logra superarlo en todos sus porcentajes a la misma edad, mostrando VPUS muy similares para los porcentajes de 5, 10, 20 y 30%.

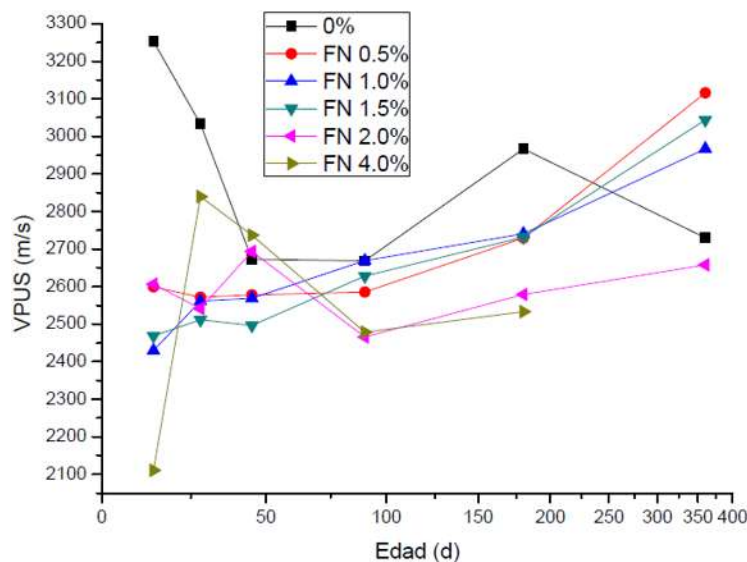
### Residuos industriales

Las VPUS para los residuos industriales son similares entre sí, solo que la EAH muestra valores ligeramente más altos en tres de sus porcentajes a edades tempranas, siendo el 15 y 20% los porcentajes de mejores características; en el caso del CBOF todas las sustituciones alcanzan a el testigo a la edad de 360 días, siendo el 15 y 20% los de más altos resultados.



Gráfica 5-36. VPUS en residuos industriales.

Fibras orgánicas



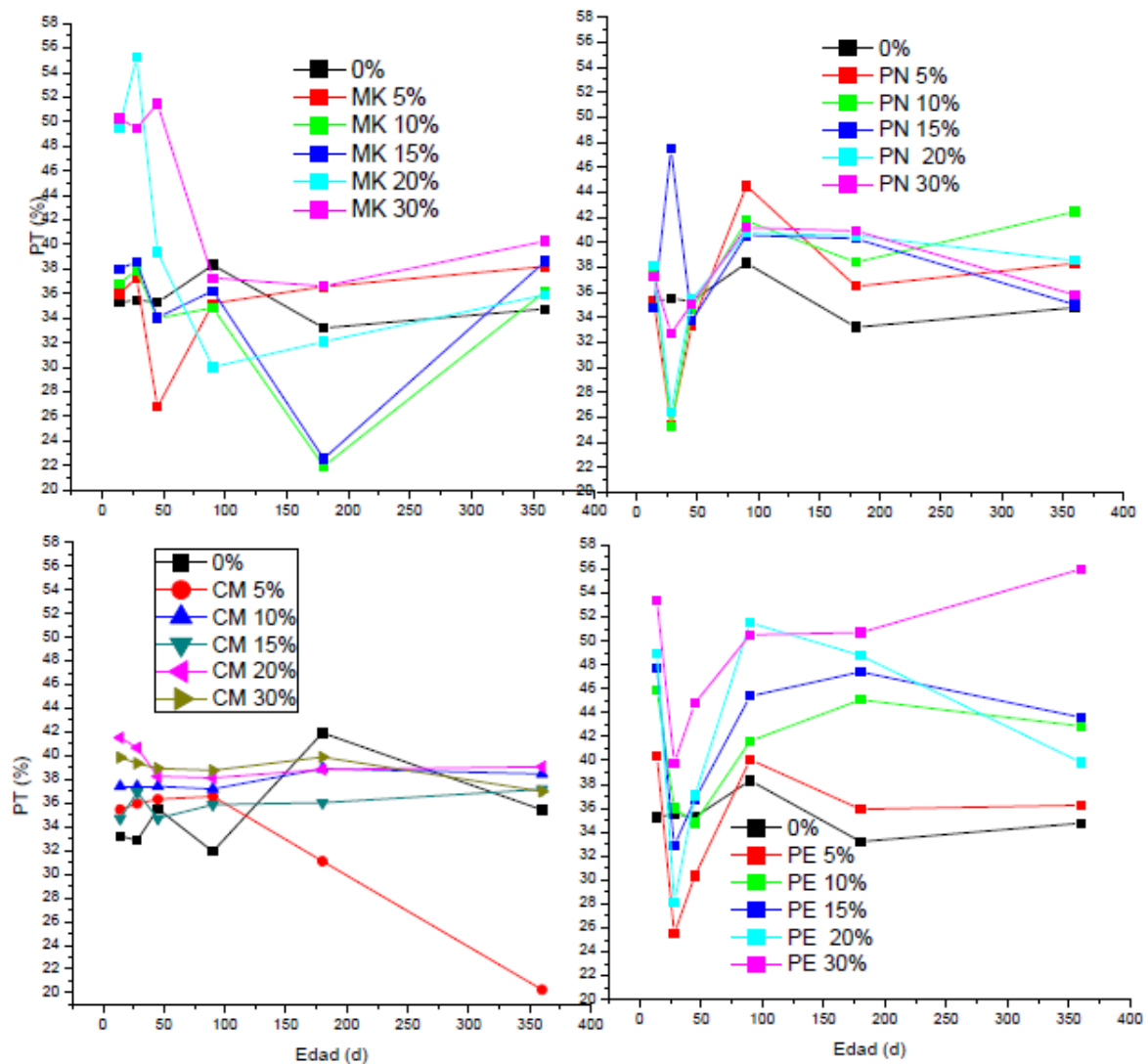
Gráfica 5-37. VPUS en la FN.

También la FN (gráfica 5-37) muestra una tendencia ligeramente inferior al testigo en las primeras edades de prueba logrando incrementarse las lecturas a los 360 días, teniendo tres de sus porcentajes con una tendencia al alza (FN 0.5-1.5%).

### 5.4.3 Porosidad total

En todas las pruebas anteriores se buscaba que las diferentes mezclas superaran a la mezcla testigo para poder demostrar así su actividad puzolánica, pero en la prueba de porosidad total se espera que aquellos materiales que si presentan la reaccionen puzolánica, den resultados de porosidad total inferiores o iguales al testigo.

#### Materiales de alta temperatura



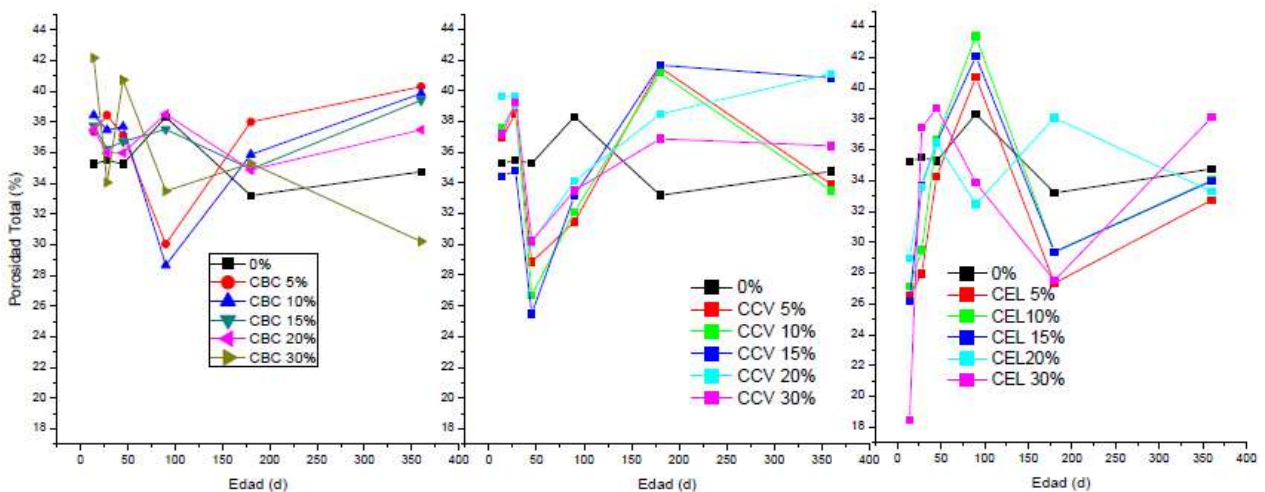
Gráfica 5-38. Porosidad total en los materiales de alta temperatura.

En la gráfica 5-38 se muestra como prácticamente los cuatro materiales de alta temperatura analizados mostraron porosidades superiores al testigo. El único material con



una tendencia estable y similar al testigo es el CM; en la sustituciones de PN se muestran dos porcentajes con tendencia a la baja con forme se incrementa la edad, dichos porcentajes son el PN 15 y 30; para la PE solo el 5% dio una porosidad ligeramente superior al testigo, mostrándose paralelo en su tendencia a partir de los 90 días; y el MK muestra una tendencia a la alza en todos sus porcentajes, siendo el que muestra porosidades iguales al testigo en las edades de 180 y 360 días pero con una tendencia ligeramente a la alza.

### Cenizas orgánicas



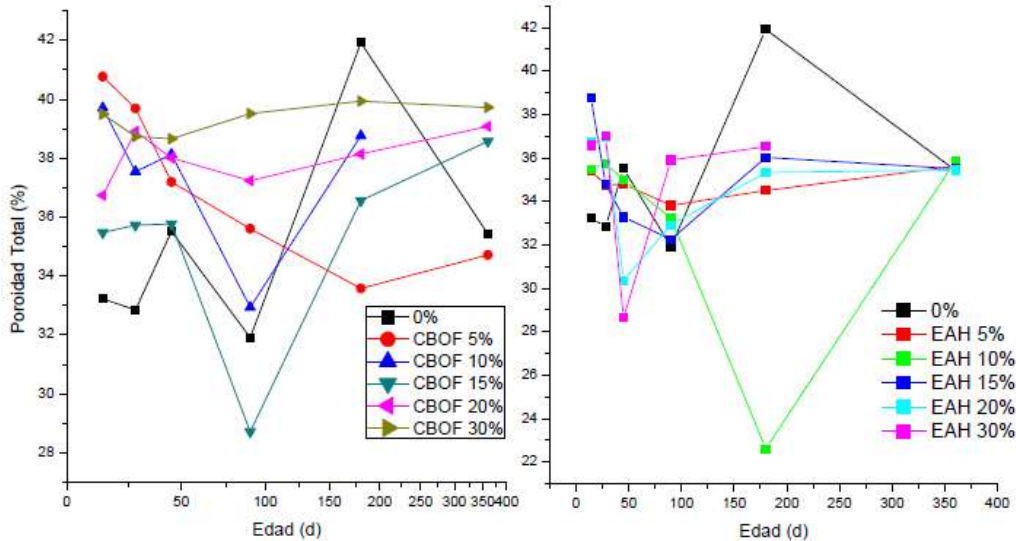
Gráfica 5-39. Porosidad total en cenizas orgánicas.

Para la cenizas orgánicas la CEL muestra resultados inferiores en las edades de 180 y 90 días (gráfica 5-39), siendo el CEL 5% el de menor porosidad; para la CBC el porcentaje con un comportamiento más cercano al testigo es el CBC 20% solo que se aprecia una ligera tendencia a la alza a partir de los 180 días; También la CCV tiene resultados ligeramente inferiores al testigo en los porcentajes de 5 y 10% pero solo a la edad de 360 días.

### Residuos industriales

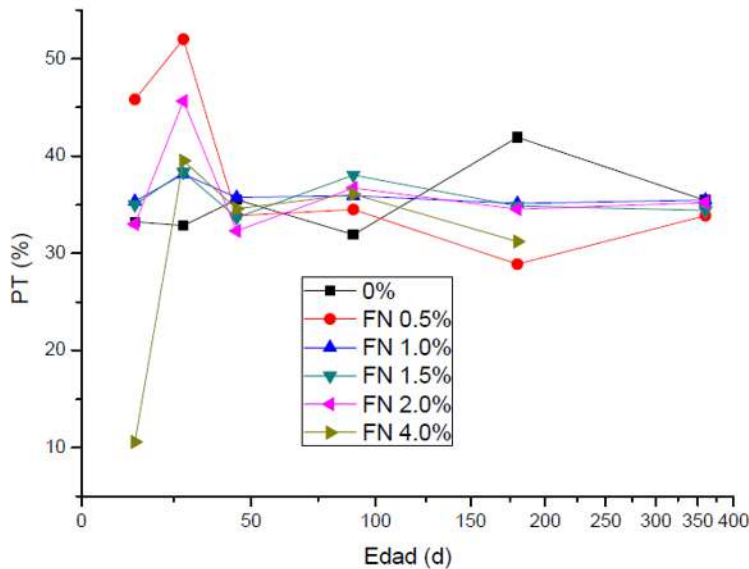
Aunque el testigo elaborado con arena del rio Lerma muestra mucha variabilidad en sus resultados de porosidad total, el CBOF 15% muestra un comportamiento paralelo e inferior al mismo hasta la edad de 180 días, también el CBOF 5% muestra una clara tendencia a la baja desde las primeras edades, terminando con una porosidad ligeramente inferior al testigo a los 360 días; en el caso la EAH todos sus porcentajes llevan una tendencia estable a lo largo del tiempo y terminan con una porosidad total igual al testigo.

Mauricio Arreola Sánchez



Gráfica 5-40. Porosidad total en los residuos industriales.

**Fibras orgánicas**

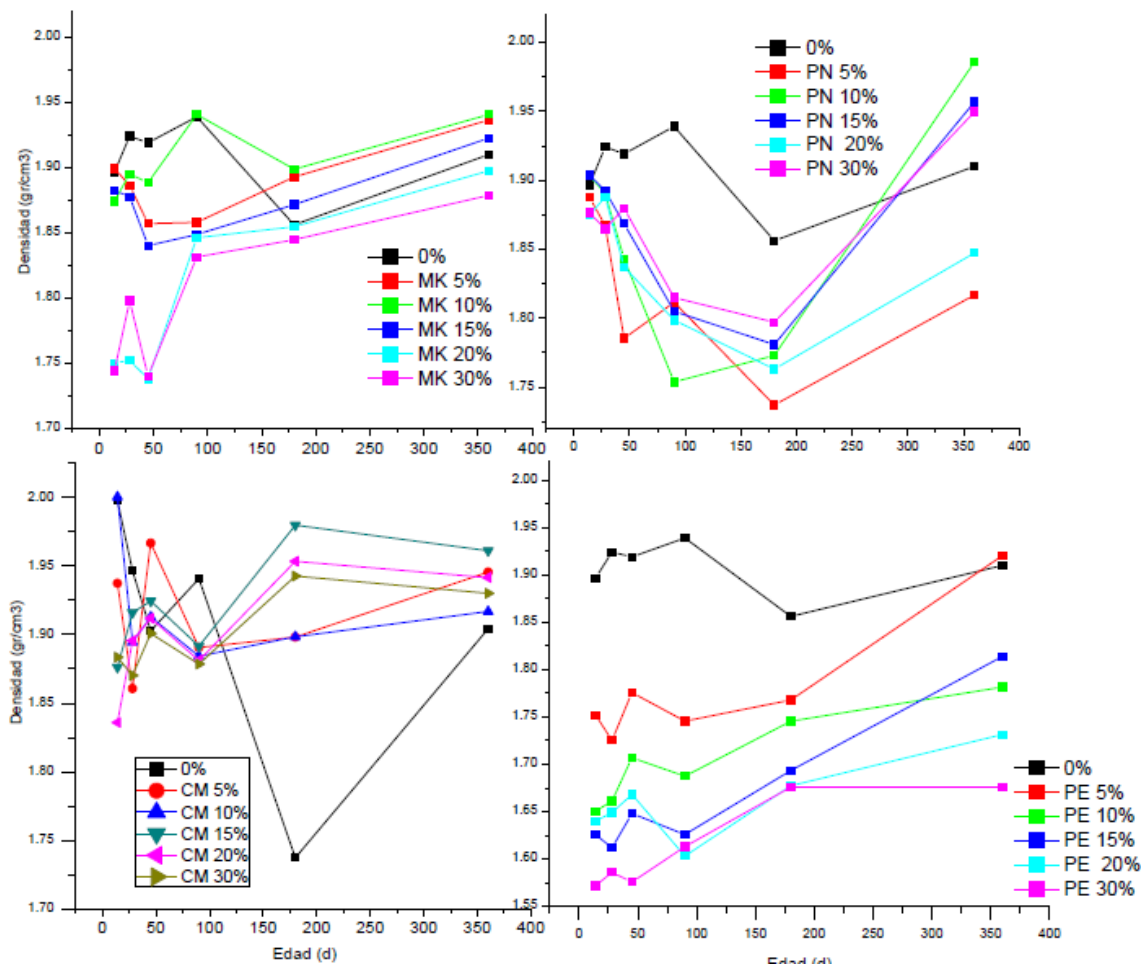


Gráfica 5-41. Porosidad total en la FN.

La FN, junto el CM, es el material que muestra el mejor comportamiento en la porosidad (gráfica 5-41), se observa poca variabilidad de resultados y un comportamiento muy similar al testigo a partir de los 45 días en todos sus porcentajes de sustitución.

### 5.4.4 Densidad

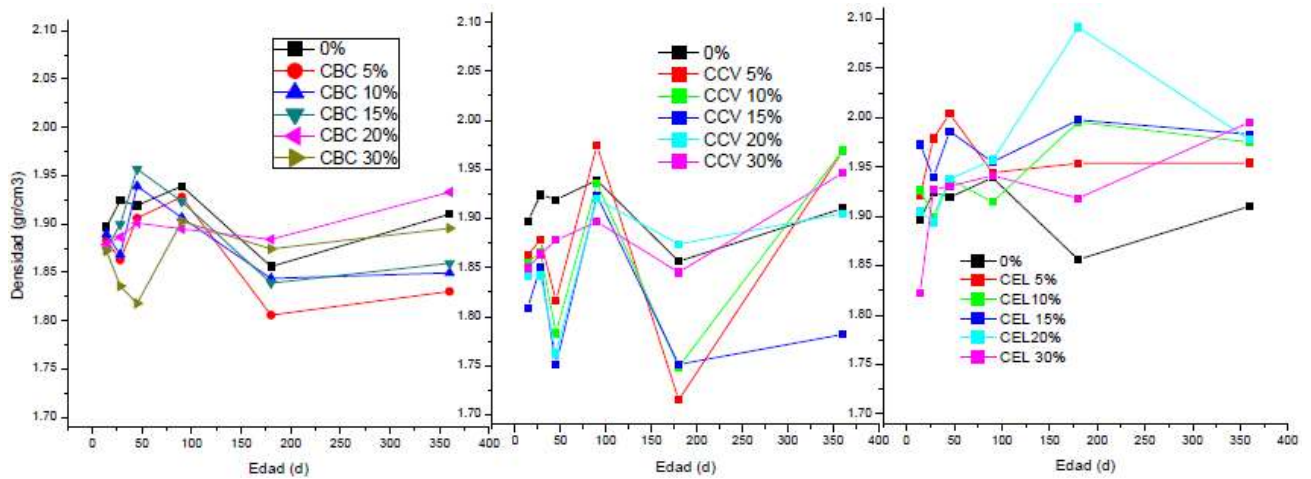
#### Materiales de alta temperatura



Gráfica 5-42. Densidad de materiales de alta temperatura.

En la gráfica 5-42, se aprecia en el MK es el único material con una densidad muy cercana al testigo en todos sus porcentajes de sustitución; La PN y PE muestran una tendencia a la alza en todos sus porcentajes, pero solo el PE 5% y el PN 10, 15 y 30% superan la densidad del testigo a la edad de 360 días; el CM se comporta un poco similar al testigo pero con una tendencia a igualarse en edades superiores a los 360 días.

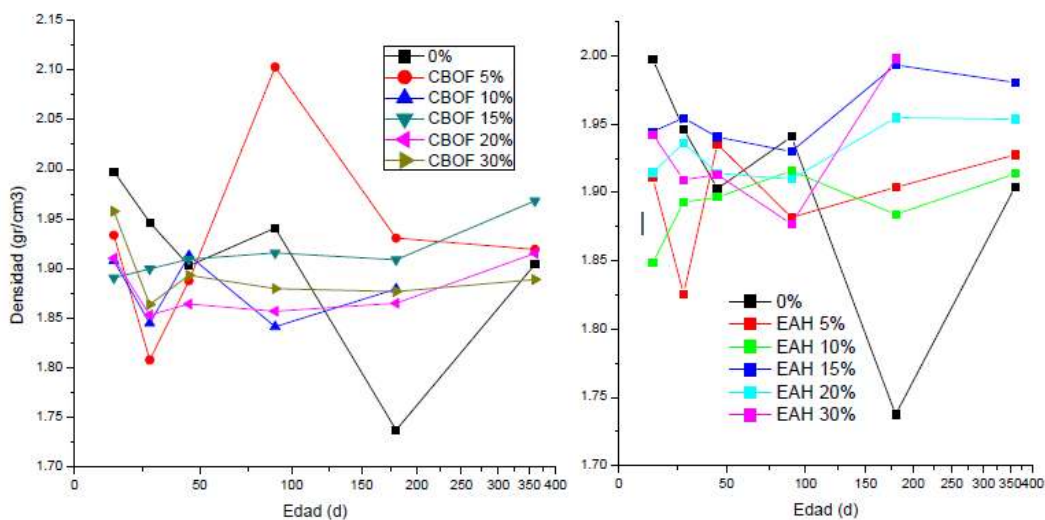
**Cenizas orgánicas**



**Gráfica 5-43. Densidad de las cenizas orgánicas.**

La CBC es la ceniza que muestra una densidad más uniforme a lo largo del tiempo (gráfica 5-43), con una tendencia generalizada a la alza, siendo el 20% el único que supera al testigo desde la edad de 180 días; para la CCV los porcentajes que se muestran más estables en sus densidades son el 20 y 30%; y para la CEL todos sus porcentajes están por encima del testigo casi en todas las edades, y todos superan al testigo en la edad de 360 días.

**Residuos industriales**

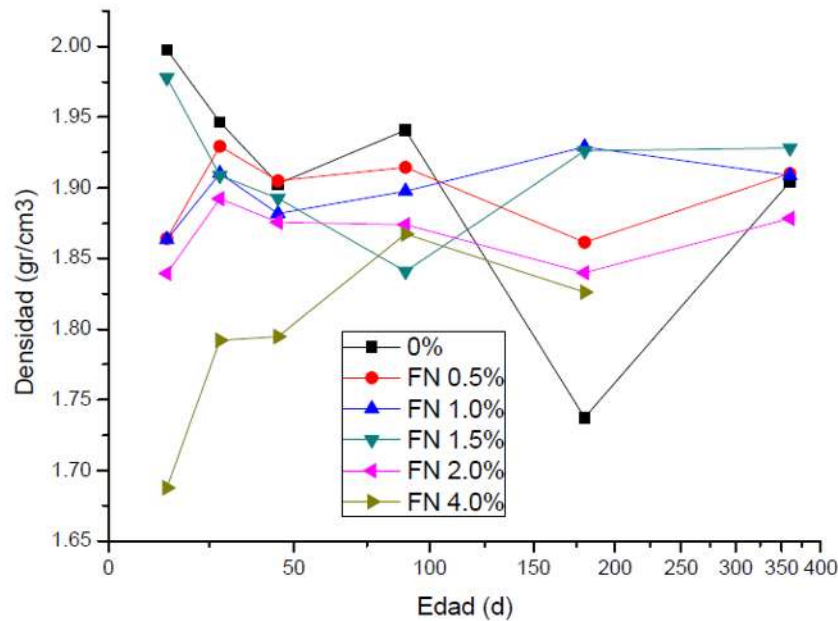


**Gráfica 5-44. Densidad de los residuos industriales.**

*Mauricio Arreola Sánchez*

Ambos residuos industriales muestran comportamientos semejantes a lo largo del tiempo (gráfica 5-44), y todos sus porcentajes tienen densidades por encima del testigo a partir de los 180 días.

**Fibras orgánicas**



Gráfica 5-45. Densidad de la FN.

Como se aprecia en la gráfica 5-45, la FN tiene un comportamiento semejante a la CBOF, CBC y MK; además de que todos sus porcentajes tienen densidades semejantes al testigo en casi todas sus edades, mostrando una tendencia a unirse en todos los porcentajes en la edad de 360 días.

## CAPÍTULO 6. ANÁLISIS COMPARATIVO

En el presente capítulo se hace una comparativa del porcentaje de sustitución que mejor se comportó, ante las diferentes sollicitaciones analizadas en esta investigación, de cada uno de los materiales con potencial puzolánico analizado.

Dicha comparación se realiza con la finalidad de poder determinar cuál material de estudio realmente presenta un mejor desempeño que la mezcla testigo, y así poder definir de forma más clara bajo que sollicitaciones, los materiales sustitutos, muestran mayor influencia.

Para esto, se eligieron de los resultados presentados en el capítulo anterior, el porcentaje que mostro el mejor desempeño en todas las pruebas estudiadas; teniendo mayor peso las pruebas de carga axial y de durabilidad, ya que son los parámetros a mejorar mediante el uso de materiales puzolánicos. Los porcentajes que mostraron el mejor desempeño fueron: MK 20%, CM 10%, PE 5%, PN 5%, CBC 20%, CCV 20%, CEL 5%, CBOF 5%, EAH 20% y FN 1.5%.

Es necesario mencionar que esta comparación se realizó únicamente con la mezcla testigo elaborada con arena de Huajúbaro, ya que comparando ambas mezclas, mostraron un tendencia a unificarse a medida que la edad de prueba se incrementaba; y dado que la mayoría de las mezclas se realizaron con arena de Huajúbaro y el testigo con dicha arena presento menor variabilidad en lo general, se decidió utilizar solo este testigo en la comparación final. A demás de que el uso de ambos testigos solo dificulta la interpretación de los resultados presentados en las gráficas.

### 6.1 Comparación gráfica de las diferentes mezclas

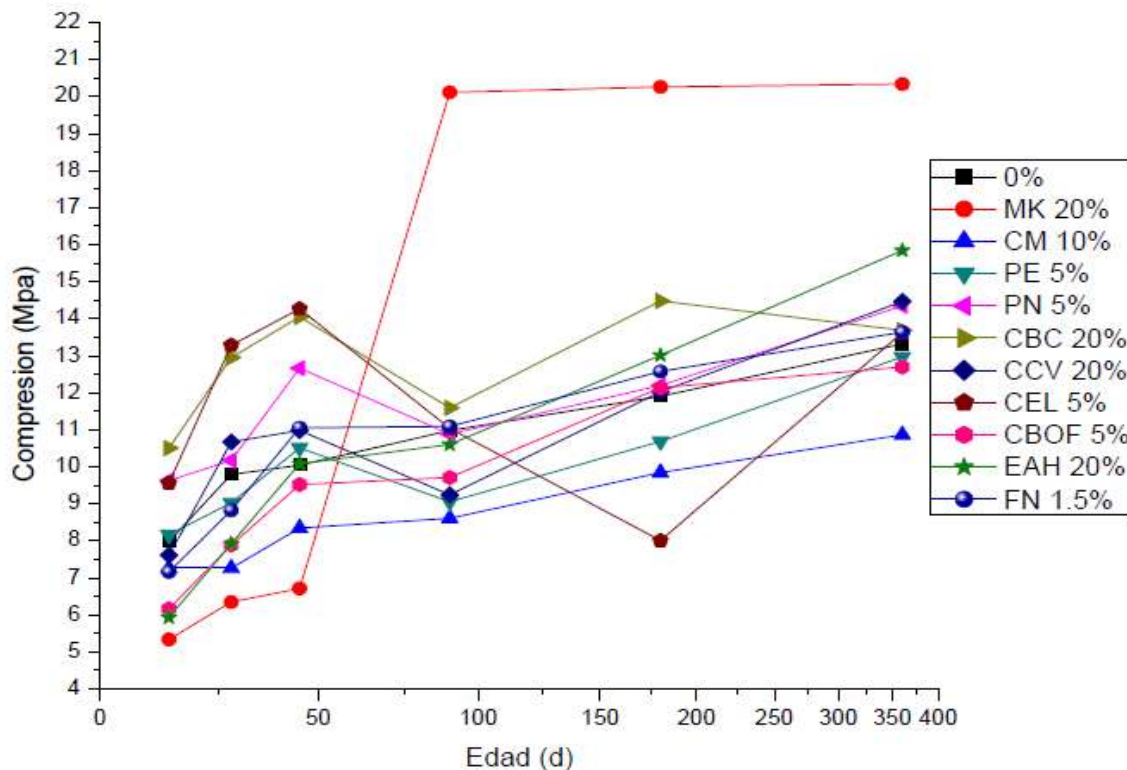
#### 6.1.1 Pruebas mecánicas

##### Carga axial

En la gráfica 6-1, se pueden distinguir los tres mejores materiales sustitutos, los cuales son MK 20, CBC 20 y EAH 20%, mismos que son los materiales con mayor porcentaje de sustitución y también de los materiales más abundantes. Le siguen en resistencia los materiales de FN 1.5, CCV 20 y PN 5% y por último se tiene a los materiales PE 5, CBOF 5 y CEL 5% que muestran resistencias un poco por debajo del testigo pero en las edades tardías logran igualar su resistencia; al final se tiene al CM ya que logro desarrollar la resistencia del testigo en las edades de prueba.

*Mauricio Arreola Sánchez*





Gráfica 6-1. Esfuerzo a compresión de mejores mezclas.

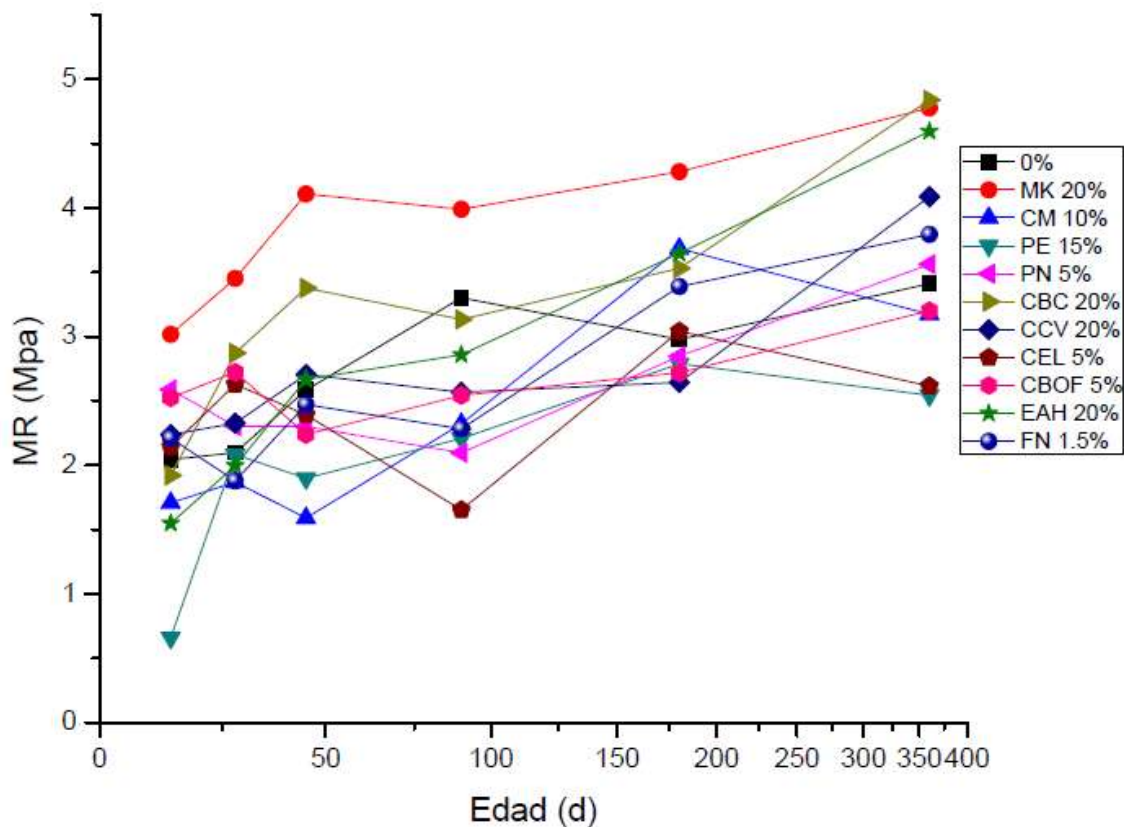
### Resistencia a la Flexión (MR)

Al igual que en la comparación de resistencia a compresión (gráfica 6-1), los tres materiales con el mejor comportamiento a flexión son MK 20, CBC 20 y EAH 20%, solo que en este caso (gráfica 6-2) no se distinguen más grupos o tendencias en el resto de los materiales, todos ellos tienen un comportamiento más o menos similar al testigo, incluido el CM 10%.

En la edad de 360 días se distinguen los materiales de PE 5 y CEL 5%, mismos que muestran resistencias alejadas del testigo; a esta edad de 360 días si son más evidentes la agrupación de materiales, distinguiéndose tres tendencias diferentes, la del MK, CBC y EAH con las mayores resistencias, CM, FN, CCV, PN y CBOF con resistencias muy semejantes al testigo y una tercer tendencia de los materiales CEL y PE que están por debajo del testigo en esta edad de prueba.

Mauricio Arreola Sánchez



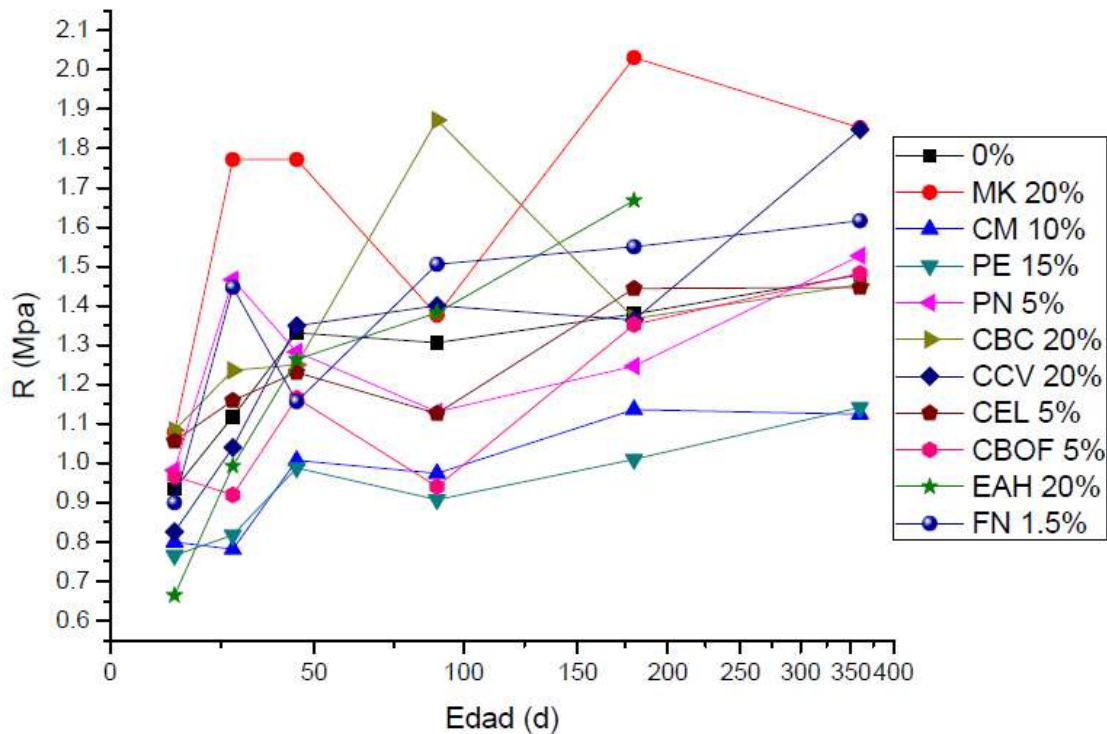


Gráfica 6-2. MR de mejores mezclas.

### Resistencia a tensión (R)

Aunque la variabilidad de resultados es mayor en la resistencia a tensión (gráfica 6-3), también se pueden distinguir los materiales con el desempeño superior al testigo, los cuales son MK, CCV, EAH y FN; los materiales que se aglomeran muy cerca de la tendencia del testigo, sobre todo en las edades tardías, son PN, CBC, CEL y CBOF; mientras que de nuevo los materiales que no logran igualar al testigo son el CM y la PE.

En esta prueba los materiales con el desempeño más uniforme y con tendencia clara a la alza son la EAH y la FN, aun que aun resto por probar la edad de 360 días de la EAH su tendencia desde las primeras edades es uniforme y con clara tendencia a superar a todos los materiales de estudio en las edades futuras de prueba.

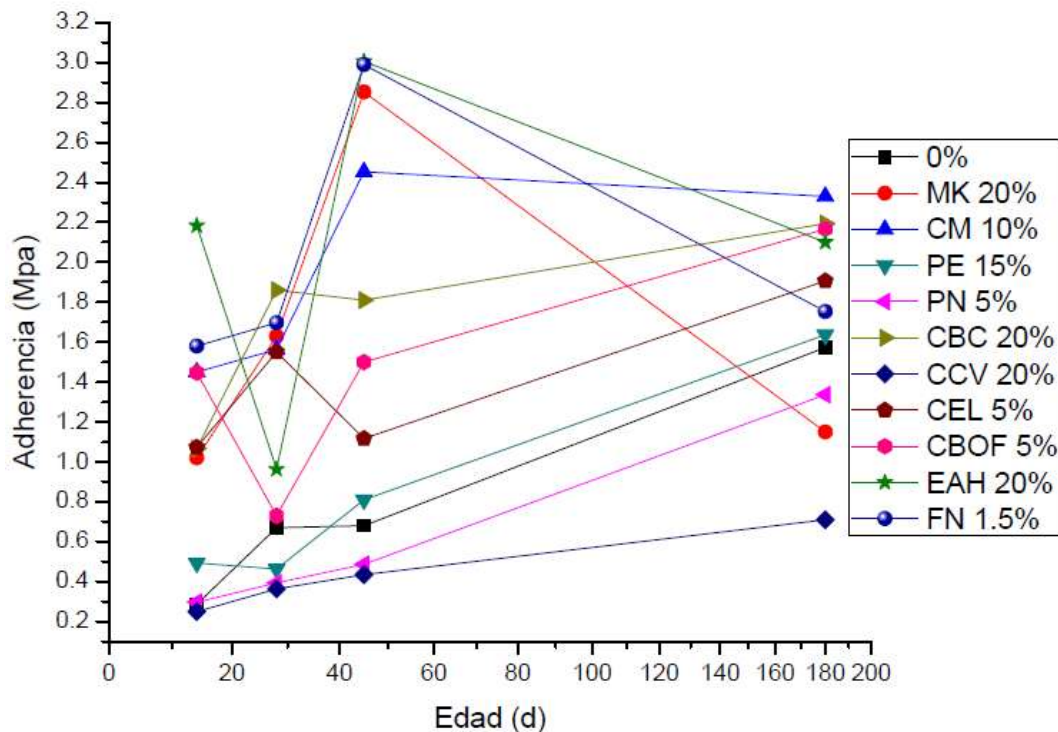


Gráfica 6-3. Resistencia a tensión de mejores mezclas.

### Adherencia

En la comparación de los resultados de adherencia no se observan grupos de comportamiento (gráfica 6-4), lo que hay que notar en esta prueba es que el CM es uno de los materiales con el mejor comportamiento junto con la CBC; y que la PE también mejoró mucho con respecto al resto de las pruebas mecánicas mostrando un desempeño ligeramente superior al testigo prácticamente en todas las edades de prueba y con una tendencia paralela al mismo.

Para esta prueba los materiales que no logran igualar el desempeño del testigo son la CBOF y la CCV, aunque la tendencia de la CBOF hace suponer que a edades de prueba mayores logrará alcanzar la adherencia del testigo, cosa que no sucede con la CCV.

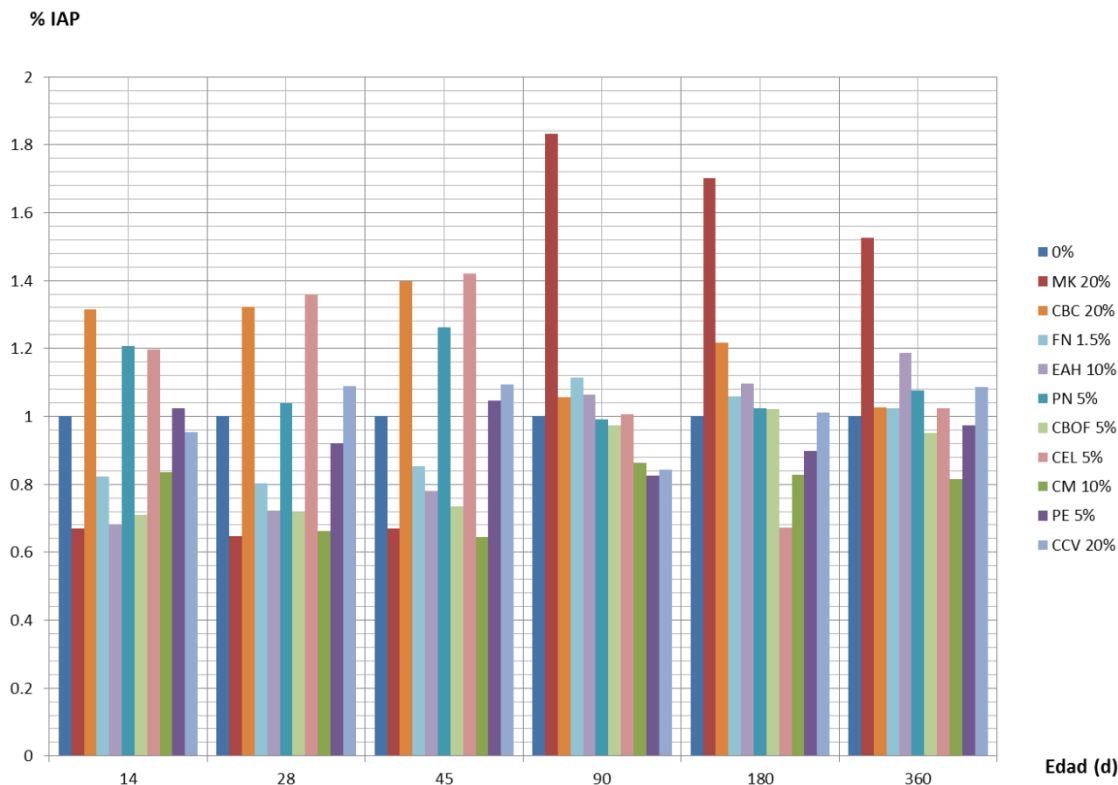


Gráfica 6-4. Adherencia de las mejores mezclas.

### Índice de Actividad Puzolánica (IAP)

En la gráfica 6-5, se aprecia como el IAP a edades tempranas no es concluyente, siendo más notorio y a partir de la edad de 90 días. En general casi todos los materiales superan el 70% de IAP a la edad de 360 días; aunque se tienen tres materiales que no logran superar la frontera marcada por la mezcla testigo, dichos materiales son CM, CBOF y PE, pero si se observa su desarrollo a lo largo del tiempo, se puede corroborar que su comportamiento es ascendente, por lo que se puede suponer que a edades superiores a los 360 días estos tres materiales logran incrementar su IAP.

Dado que este indicador de actividad puzolánica está directamente ligado a la resistencia a compresión, los grupos de comportamiento que se aprecian en la gráfica 6-5 son los mismos que los de la gráfica 6-1.



Gráfica 6-5. IAP de mejores mezclas.

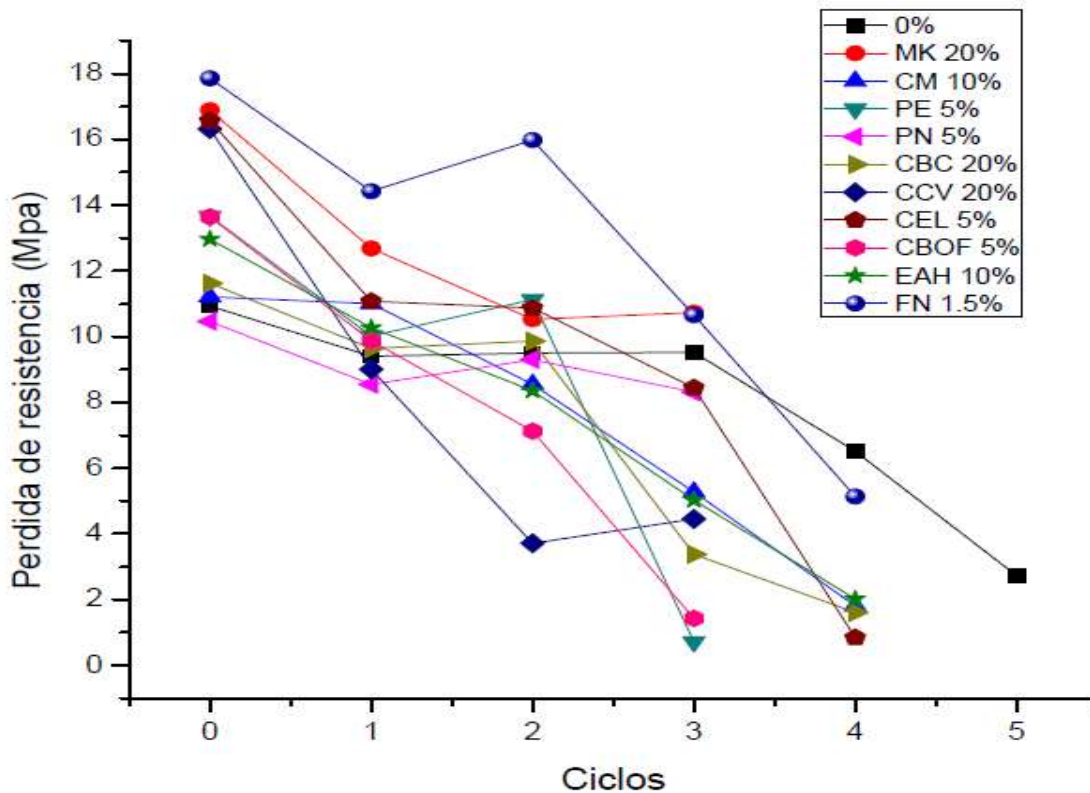
### 6.1.2 Prueba de durabilidad

#### Pérdida de resistencia a compresión

Los materiales con el mejor comportamiento de durabilidad fueron el MK y la FN, ya que lograron soportar hasta el cuarto ciclo y con una pérdida de resistencia menor que el testigo (gráfica 6-6); seguidos de los materiales CBC, CEL, EAH y CM que también soportaron hasta el cuarto ciclo de ataque por sulfatos pero con una pérdida de resistencia mucho mayor al testigo; y por último se aprecian los materiales con un pobre desempeño de durabilidad, los cuales son CBOF, CCV, PE y PN los cuales solo soportaron hasta el tercer ciclo de ataque.

Cabe mencionar que la prueba de ataque por sulfatos fue hecha a la edad de 90 días, y que según los resultados mecánicos, la mayoría de los materiales de estudio desarrollaron mayor resistencia que el testigo a partir de la edad de 180 y 360 días.

Mauricio Arreola Sánchez

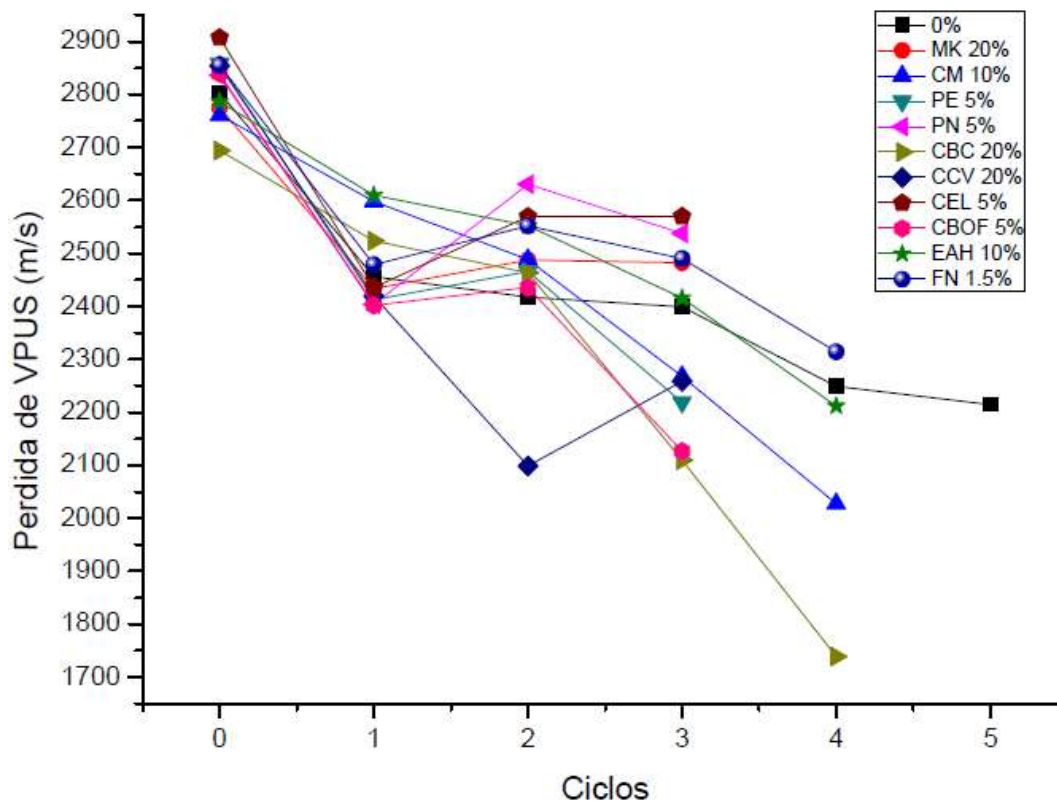


Gráfica 6-6. Perdida de resistencia de mejores mezclas.

### Pérdida de velocidad de pulso ultrasónico (VPUS)

Como se puede comprobar en la gráfica 6-7, el comportamiento de los materiales sustitutos en la prueba de VPUS, es un poco diferente que en el caso de la pérdida de resistencia mecánica, ya que en este caso se observan dos grupos de comportamiento claros, el primero con una pérdida de VPUS menor al testigo (PN, CEL, FN, MK y EAH); y el segundo grupo con una pérdida de VPUS mayor al testigo (CBC, CBOF, CM, CCV y PE).

Aunque al comparar los resultados con los de pérdida de resistencia, estos son equivalentes.

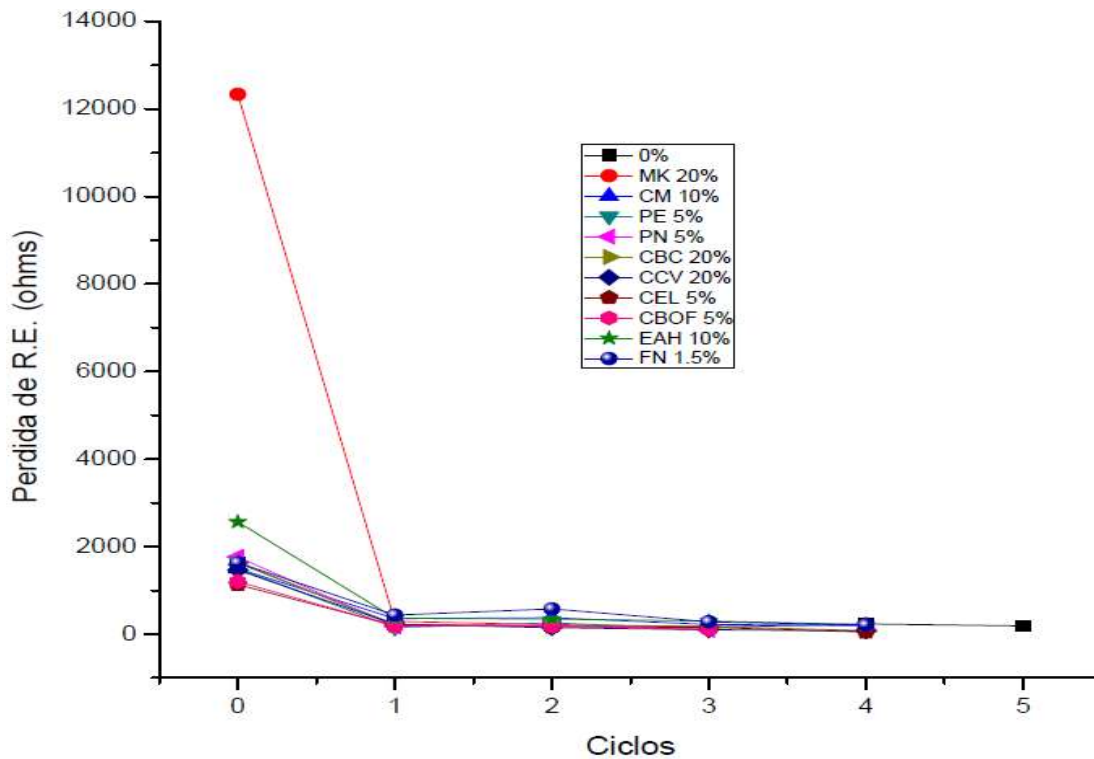


Gráfica 6-7. Pérdida de VPUS de las mejores mezclas.

### Pérdida de resistencia eléctrica (R.E.)

La gráfica 6-8 muestra el comportamiento típico presentado en todas las mezclas estudiadas en la prueba de durabilidad, la resistencia eléctrica tiene una caída brusca a partir del primer ciclo de ataque por sulfatos de sodio.

Como ya se comentó en el apartado de resultados, este comportamiento se puede deber a la alta conductividad del sulfato de sodio y al incorporarse en los poros y en la superficie de los especímenes de prueba se reduce por completa la resistencia de los mismos, por consiguiente, a partir del primer ciclo solo se mide la conductividad de las sales de sulfato de sodio y no de la matriz del mortero.

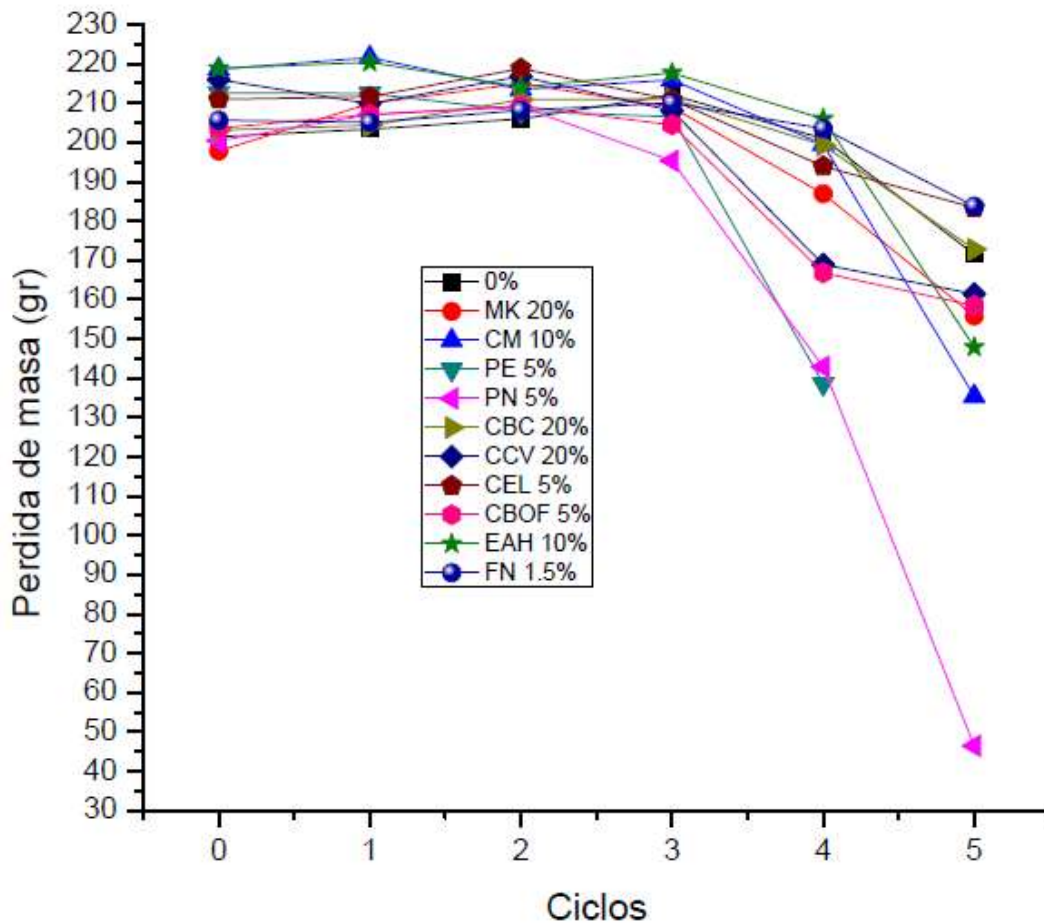


Gráfica 6-8. Perdida de R.E de mejores mezclas.

### Pérdida de masa

Al igual que en la mayoría de las pruebas mecánicas, en la gráfica 6-9 se pueden apreciar tres grupos de comportamientos, el primero de materiales que tienen pérdidas de masa igual o menor que el testigo (FN, CBC y CEL), el segundo con materiales que presenta pérdidas de masa ligeramente inferiores al testigo (MK, CM, CCV, EAH y CBOF) y por último los materiales con pérdidas de masa mucho mayores al testigo (PN y PE).





Gráfica 6-9. Pérdida de masa.

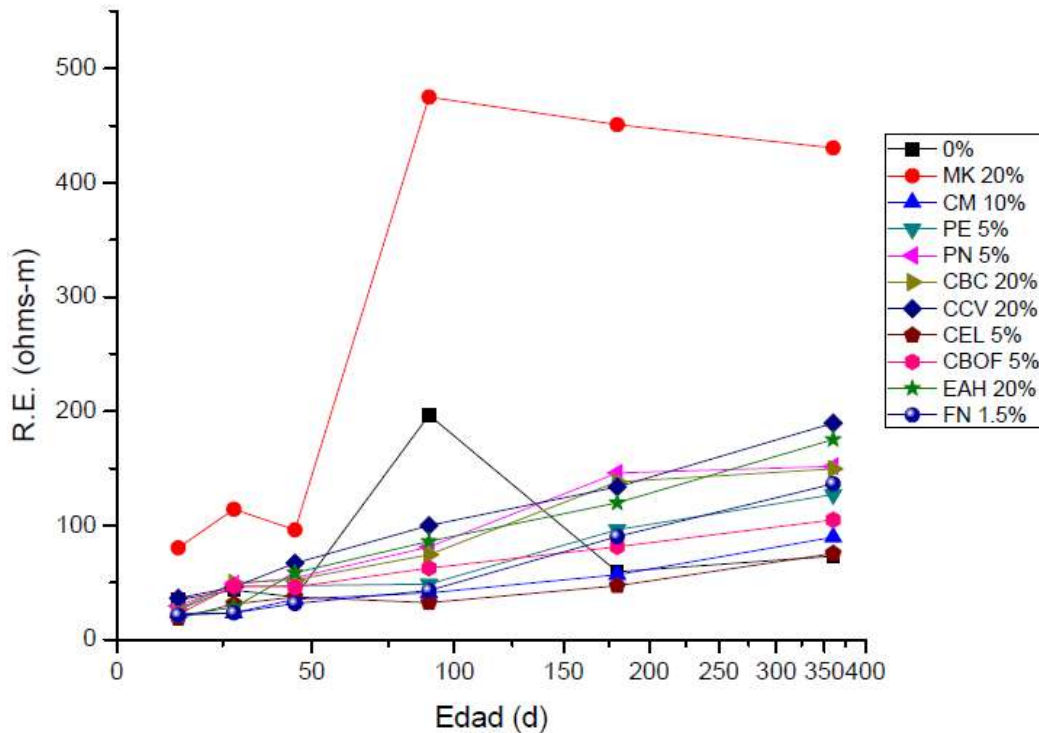
### 6.1.3 Pruebas no destructivas

#### Resistividad eléctrica

En la gráfica 6-10 se observa un comportamiento generalizado de la evolución de la resistividad en todas las mezclas comparadas, siendo únicamente la pendiente de cada una de ellas lo que las diferencia; a excepción del MK, el cual muestra un comportamiento aislado y mucho mayor al del resto de materiales.

En la gráfica se observa como todos los materiales sustitutos igualan y/o superan al testigo a partir de la edad de 180 días.

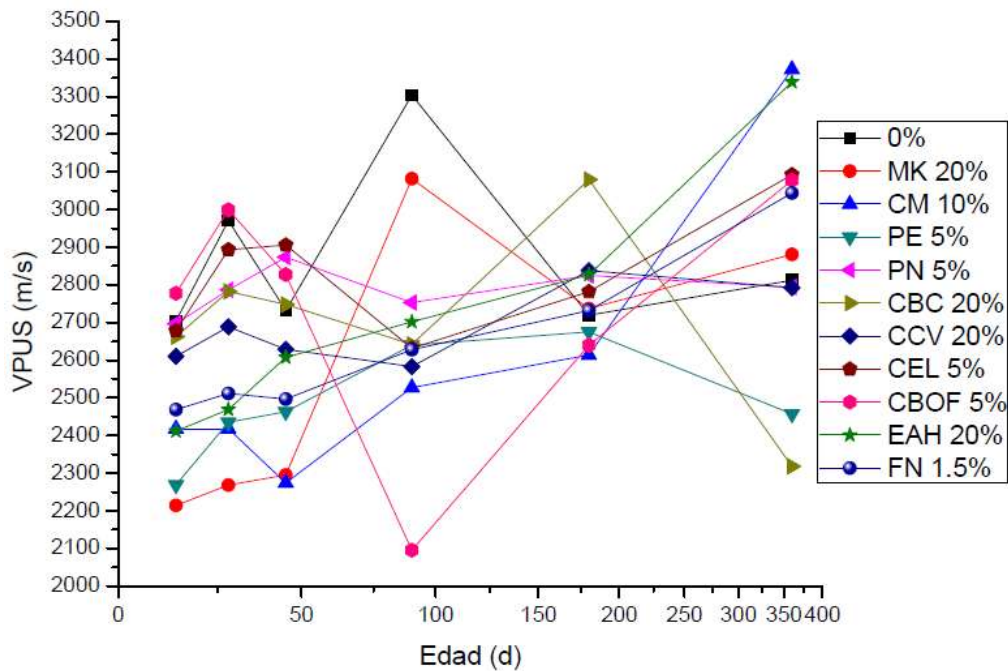
Mauricio Arreola Sánchez



Gráfica 6-10. R.E. de mejores mezclas.

### Velocidad de pulso ultrasónico (VPUS)

En el comportamiento de la VPUS de los mejores porcentajes de cada material sustituto, se observa mucha variabilidad en las tendencias y valores. Siendo únicamente tres materiales los que presentan un comportamiento uniforme y tendencia al alza según lo esperado y explicado en el capítulo cuatro, los cuales son FN, EAH y CM; el resto de los materiales no muestran tendencias claras y habría que esperar a recabar más información para tener más certeza de su desempeño general a lo largo del tiempo.

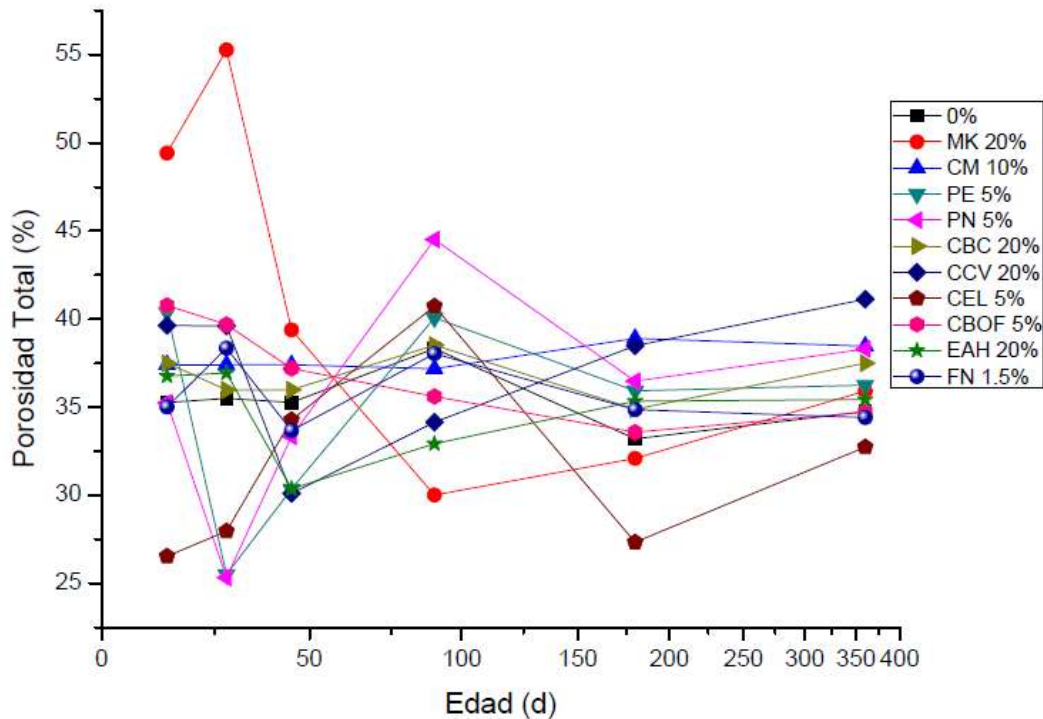


Gráfica 6-11. VPUS de mejores mezclas.

### Porosidad total

En la gráfica 6-12 se observa una presidida total por encima del testigo en la gran mayoría de los materiales comparados, siendo únicamente la FN, el CBOF y la EAH los materiales que lograron desarrollar una porosidad muy similar a la testigo, pero solo a la edad de 360 días.

Cabe recordad que el método aplicado en la determinación de la PT, es un método que relaciona el peso hidrostático de la muestra y por lo tanto tal porosidad total, es posible, que este influenciada por la densidad de las diferentes cenizas; además de que por cuestiones de tiempo de operación el procedimiento de prueba difirió del propuesto por el autor.



Gráfica 6-12. Porosidad total de las mejores mezclas.

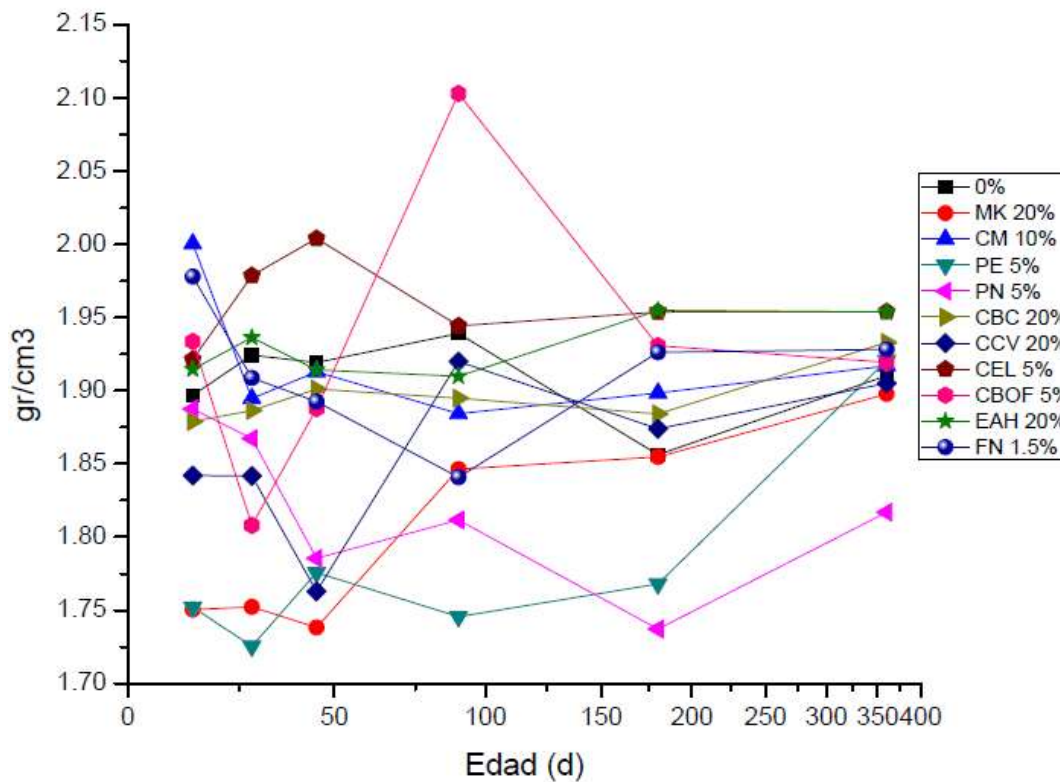
### Densidad

Como se puede observar en la gráficas 6-13, la densidad de todos los porcentajes de sustitución comparadas tienden a igualarse al testigo en a partir de la edad de 180 días, siendo mucho más evidente en la edad de 360 días.

Lo anterior puede deber a dos factores, el primero es que la densidad de la ceniza o material sustituto sea del mismo rango que la del cemento portland, por lo que la densidad del mortero hecho con las misma características que el testigo muestre una evolución de su densidad muy semejante al mismo (un ejemplo de esto sería el CM, que mecánicamente no muestra indicios de actividad puzolánica y su densidad es similar al testigo). El segundo y más deseables factor, es que independientemente de la densidad del cementante sustituto, la densidad se iguala paulatinamente al testigo gracias a la densificación de la matriz del mortero por la formación de más productos de reacción del

Mauricio Arreola Sánchez

cemento portland gracias a la reacción puzolánica del cementante sustituto (posibles ejemplos de esto serían la CBC, FN y PE).



Gráfica 6-13. Densidad de las mejores mezclas.

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Como ya se mostró en el capítulo anterior, la mayoría de los materiales sustitutos estudiados en la presente investigación, muestran un buen desempeño en las sollicitaciones mecánicas, sobre todo en edades superiores a los 90 días, mas sin embargo son pocos los materiales que presentan buenos resultados en durabilidad, lo que nos permite acotar los materiales con un desempeño optimo en todo el estudio aquí presentado.

Según lo mostrado en el capítulo 6, los porcentajes con mejor desempeño en cada material sustituto serian: MK 20%, CM 10%, PE 5%, PN 5%, CBC 20%, CCV 20%, CEL 5%, CBOF 5%, EAH 20% y FN 1.5%.

De igual manera que la prueba de durabilidad, las pruebas indirectas de VPUS, densidad y R.E. nos permiten identificar cuál de los porcentajes arriba indicados, muestra desarrollo de propiedades uniformes a lo largo del tiempo, mostrando una tendencia clara de su desempeño.

Lo anterior nos permite clasificar a los materiales estudiados según su desempeño mostrado en:

- Materiales con desempeño óptimo, que son los que mostraron mejoras tanto mecánicas como de durabilidad y su comportamiento fue constante y consecuente en las diferentes pruebas hechas. Estos materiales son CBC 20%, MK 20%, EAH 20% y FN 1.5%
- Materiales con un desempeño mecánico aceptable, pero con poca durabilidad y comportamientos no consecuentes, los cuales son: CCV 20%, PN 5%, PE 5%, CBOF 5%, CEL 5% y CM 10%.

Dentro de los materiales con pobre desempeño general, existen algunos que presentaron buenas características bajo una sollicitación en particular, por ejemplo le CM 10% y la PE 5% presentaron buenos resultados a flexión y adherencia.

En particular todos los porcentajes de sustitución de CM, CBOF y EAH fluidificaron la mezcla mucho más de lo que el aditivo hiperfluidificante lograba y lo hacían sin provocar segregación en la pasta ni exudación o sangrado excesivo. Por lo cual se podrían estudiar en trabajos futuros mezclas ternarias con estos materiales y así poder reducir mucho más

la relación a/c sin la necesidad de fluidificantes y aprovechando las particularidades de cada material.

## CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

[1] S. Marquez-Montero et al, «Efecto de la sustitución parcial del cemento portland por CBCA en la durabilidad de concretos expuestos a cloruros y sulfatos», ALCOMPAT 2010. Xalapa, Veracruz, México.

[2] Idalberto Águila y Milena Soso, «Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos», Universidad Central de Venezuela. Revista de la facultad de ingeniería, vol. 23, N° 4, pp.51-62, 2008.

[3] Cardim de Carvalho Filho, Arnoldo., “Análisis del Ciclo de Vida de Productos Derivados de Cemento-Aportaciones al Análisis de los Inventarios del Ciclo de Vida del Cemento”, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Barcelona, España, 2001.

[4] [http://www.canacem.org.mx/la\\_industria\\_del\\_cemento.htm](http://www.canacem.org.mx/la_industria_del_cemento.htm), 9 de julio del 2013.

[5] <http://dgcc.sct.gob.mx/index.php?id=849>, 9 de julio del 2013.

[6] <http://dgcc.sct.gob.mx/index.php?id=884>, 9 de julio del 2013.

[7] Rangel López, Celis., Pérez Quiroz, José Trinidad., Torres Acosta, Andrés Antonio., Martínez Madrid, Miguel., Martínez Molina Wilfrido., Ariza Aguilar, Luis Eduardo., Zamudio Cíntora Emilio., Genescá Longueras, Joan., Valdez Salas Benjamín., “Durabilidad de la Infraestructura de Concreto Reforzado Expuesto a Diferentes Ambientes Urbanos de México”. Secretaria de Comunicaciones y Transportes., Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica N° 292, Sanfandila, Querétaro, México, 2006, ISBN 0188-7297.

[8] U.I. Hernández-Toledo, P. Montes-García, T. Caballero-Aquino, «Efecto de la ceniza de bagazo de caña y el tiempo de curado en las propiedades de morteros», CIIDIR-IPN-Oaxaca, Oaxaca, México, 2010.

[9] Sagar - Sagarpa, Sistema Integral de Información Agroalimentaria y Pesquera, Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON), 1980-2009.

[10] Aguilar-Rivera, Noé., Galindo, G. M., Fortanelli J. M., Contreras C.S. “¿Por qué diversificar la agroindustria azucarera en México?”, Revista Globalización, Competitividad y Gobernabilidad, Georgetown University – Universia, 2009, Vol. 3 N°. 1, ISSN: 1988-7116.



- [11] Kosmatka, Steven H., et al., *“Diseño y Control de Mezclas de Concreto”*, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797., México, 2004., ISBN 0-89312-233-5.
- [12] Newman, J., Choo, B.S., *“Advanced Concrete Technology Constituent Materials”*, First published, Butterworth-Heinemann, imprint of Elsevier, (2003). ISBN 0 7506 5103 2
- [13] Pacífica, R. m. (2008). *“Evolución reciente de la industria de cemento”*., PORTES, Revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del Pacífico., Tercera Época • Volumen 2 • Número 3 • Enero / Junio 2008 • Colima, México. Págs. 165-202.
- [14] Neville, A. M. *“Tecnología del concreto”*. México DF.: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., 1999.
- [15] E., Rivera Flores. *“Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja”*. s.l. : Facultad de Ingeniería Civil, págs. 5-22.
- [16] Hernández Toledo, Ur Iván., *“Efecto de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento”*., Instituto Politécnico Nacional, centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional, unidad Oaxaca., Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales., Sta. Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México., Junio de 2010.
- [17] Instituto del concreto. *“Manual Tecnología y Propiedades”*. Tercera reimpresión. Colombia: Asociación colombiana de productores de concreto ASOCRETO, 1997.
- [18] imcyc.com. IMCYC. Retrieved OCTUBRE 8, 2012.  
<http://www.imcyc.com/normas/414%20cemento%20hidraulico2.pdf>
- [19] Cruz Jiménez, Luis., *“Comportamiento Mecánico del Carbón Mineral y de la Escoria de Alto Horno en Morteros como sustituto parcial del cemento”*., Tesis de licenciatura., Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil., Morelia, Michoacán, México., Noviembre del 2012.
- [20] [http://catalogocemexcr.com/pdfs/cemex/concretos\\_cemex.pdf](http://catalogocemexcr.com/pdfs/cemex/concretos_cemex.pdf), Julio del 2013.
- [21] [http://catalogocemexcr.com/pdfs/cemex/concretos\\_cemex.pdf](http://catalogocemexcr.com/pdfs/cemex/concretos_cemex.pdf), Julio del 2013.
- [22] Paulo Helene y Fernanda Pereira., *“Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección”*., Versión electrónica en CD, Sao Paulo, Brasil, 2003. ISBN 85-903707-1-2.
- [23] Neville, A. M., Brooks, J.J. *“Concrete Technology”*., second edition.,ED. Pearson. England, 2010. ISBN 978-0-273-73219-8.
- [24] Segarra Foradada, Judit. *“Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en hormigón”*, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2005.

Mauricio Arreola Sánchez

- [25] Rick, Montani. *“La Carbonatación, Enemigo olvidado del Concreto”*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Revista Construcción y Tecnología, Diciembre, 2000, México.
- [26] Sánchez de Guzmán, D., *“concretos y morteros”*. Colombia: Instituto del Concreto., 2006.
- [27] Mamlouk, M. s., & Zaniewski, J. P., *“Materiales para ingeniería civil”*., Madrid, España., Pearson education., 2009.
- [28] Mendoza, Demetrio, Brito Benitez, Eva Leticia y Arenas Alatorre, Jesús A. 2004. *“La ciencia de materiales y su impacto en la arqueología”*. 2004, págs. 156-159.
- [29] <http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/morteros-de-cemento-portland.html>, Julio del 2013.
- [30] Neville, A. M., *“Tecnología del Concreto”*. Primera edición. México., Ed. Trillas, 1998.
- [31] Jacobo Martinez-Reyes, Rafael Alavez-Ramírez, Pedro Montes-García, Victor Jiménez-Quero. *“Determinación microestructural del efecto puzolánico de una arcilla tratada térmicamente en la zona de interface-matriz en morteros”*. X Congreso Nacional de Microscopía-Morelia. Morelia, México, 2010.
- [32] Malhotra V.M. and Mehta P. K. *“Puzzolanic and cementitious materials”*, Advances in Concrete Technology, Edit. Gordon and Brach Publishers, 1996.
- [33] J. Iván Escalante, A. Navarro, L. Y. Gómez, *“Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza”*, Revista ALCONPAT, Volumen 1, Número 2, Mayo-Agosto 2011, Páginas 156 – 169.
- [34] M. Sahmaran y V.C. Li., *“Study Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash”*. Cement and Concrete Research, 2009. 39(11):p. 1033–1043.
- [35] P. Chindaprasirt, C. Chotithanorm, H.T. Cao y V. Sirivivatnanon, *“Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete”*. Construction and Building Materials, 2007. 21(2):p. 356–361.
- [36] M. Bohác y M. Gregerova, *“The influence of blast-furnace slag hydration products on microcracking of concrete”*. Materials Characterization, 2009. 60(7):p. 729–734.
- [37] H. W. Song y V. Saraswathy, *“Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—an overview”*. Journal of Hazardous Materials, 2006. 138(2):p. 226–233.
- [38] R. Manoharan, P. Jayabalan y K. Palanisamy, *“Effect of chemical admixture on corrosion resistance of reinforced steel rods in concrete”*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2009. 4(1):p. 13–26.

- [39] K. Ganesan y K. Rajagopal, "Evaluation of bagasse ash as corrosion resisting admixture for carbon steel in concrete". *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2007. 54(4):p. 230-236.
- [40] B. Chatveera a y P. Lertwattanakul, "Durability of conventional concretes containing black rice husk ash". *Journal of Environmental Management*, 2011. 92(1):p. 59-66.
- [41] A. Ramezani-pour, M. Mahdi khani y G. Ahmadibeni, "The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes". *International Journal of Civil Engineering*, 2009. 7(2):p. 83-91.
- [42] S. Rukzon y P. Chindaprasirt, "Durability an Experimental Investigation of the Carbonation of Blended Portland Cement Palm Oil Fuel Ash Mortar in an Indoor Environment". *Indoor Built Environment*, 2009. 18(4):p. 313-318.
- [43] C. H. K. Lam, A. W. M. Ip, J. P. Barford and G. McKay, "Use of Incineration MSW Ash: A Review" *Sustainability*, 2010. 2(7):p. 1943-1968.
- [44] W.T. Tsai y Y.H. Chou, "An overview of renewable energy utilization from municipal solid waste (MSW) incineration in Taiwan". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006. 10(5):p. 491-502.
- [45] U. I Hernández Toledo, R. Alavéz Ramírez y P. Montes García, "Cenizas de coco y hoja de pino para su uso como puzolana". *Naturaleza y Desarrollo*, 2009. 7(2):p. 34-45.
- [46] A. Del Valle Moreno, T. Pérez López, M. Martínez Madrid, "El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado", IMT, *Publicación Técnica No.182*, Qro. México, 2001.
- [47] [http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaeupa/boletin\\_informativo/pdf/boletines/10/12.%20LA%20PUZOLANA.pdf](http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaeupa/boletin_informativo/pdf/boletines/10/12.%20LA%20PUZOLANA.pdf), Julio del 2013.
- [48] ASTM C 618 – 03, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete".
- [49] Neville AM. "Properties of concrete". New York: Wiley; 1997.
- [50] Lang E. Blast furnace cements. In: Bensted J, Barnes P, editors. "Structure and performance of cements". New York: Spon Press; 2002. p. 310-26.
- [51] J.I. Escalante, L.Y. Gómez, K.K. Johal, G. Mendoza, H. Mancha, J. Méndez. "Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions". *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 1403-1409.
- [52] Daube J, Bakker R. "Portland Blast furnace slag cement: a review". In: Frohndsdorff G, editor. *Blended cements ASTM STP 897*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1986. p. 5-14.

- [53] J.I. Escalante-García, L.J. Espinoza-Pérez, A. Gorokhovskiy, L.Y. Gómez-Zamorano. "Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement". *Construction and Building Materials* 23 (2009) 2511-2517.
- [54] Zhang S., Gong K., Lu J. (2004). "Novel Modification Method for Inorganic Geopolymer by Using Water Soluble Organic Polymers". *Materials Letters.*, Vol.58.P.p. 1292 – 1296.
- [55] Cioffi R., Maffucci L, Santoro L.(2003). "Optimization of Geopolymer Synthesis by Calcination and Polycondensation of Kaolinitic Residue". *Resources Conservation and Recycling.*, Vol.40.P.p. 27-38.
- [56] Lee W.K.W., Van Deventer J.S.J. (2002). "Effects of Anions on the Formation of Aluminosilicate Gel in Geopolymers". *Ind. Eng.Chem.Res.*, Vol.41.P.p.4550-4558.
- [57] Patente: "Process for using sludge from geothermal brine to make concrete and concrete composition". Numero de patente: 4900360. Inventores: Olin D. Whitescarver, Indian Wells; Jonathan T. Kwan (1990), E. U.
- [58] Diaz, C.; Rincon, J. M.: "Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 29 (1990), pp. 181-184.
- [59] Gomez-Zamorano, L. Y.: Tesis doctoral: "Geothermal waste as a replacement material of Portland cement pastes", Cinvestav – Unidad Saltillo, Mexico (2004).
- [60] L. Y. Gómez-Zamorano, J. I . Escalante-García, G. Mendoza-Suárez. "Geothermal waste: An alternative replacement material of Portland cement". *Journal of materials science* 39 (2004) 4021 – 4025.
- [61] L. Y. Gómez-Zamorano, J. I. Escalante. "Hidratación y microestructura de cemento Portland sustituido parcialmente con sílice ultrafina". *Materiales de Construcción*, Vol. 59, 296, 5-16. Octubre-diciembre 2009. ISSN: 0465-2746.
- [62] González Benito, F. J. (2008, julio 11). Open Course Ware. from Universidad Carlos III de Madrid. Consultado en julio del 2013.
- [http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Apuntes\\_Introduccion\\_a\\_las\\_Tecnicas\\_de\\_Caracterizacion.pdf/view](http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Apuntes_Introduccion_a_las_Tecnicas_de_Caracterizacion.pdf/view)
- [63] Manjón Miguel, j. L., & Martínez Martínez, J. A. "Evolución de la composición de los morteros en los puentes de fábrica". *Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, (pp. 623-630). Burgos, 2007.
- [64] [http://xml.cie.unam.mx/xml/ms/Doctos/FUNDAMENTOS\\_FRX.pdf](http://xml.cie.unam.mx/xml/ms/Doctos/FUNDAMENTOS_FRX.pdf), consultado en julio del 2013.

[65] Eugenia Estop. “Difracción de rayos-X”. Modulo No.2 Materiales y técnicas de caracterización. Trainmonher, Coordinator: Aureli Alvarez, UAB, Barcelona, España.

[66] <http://www.nitcharacter.com/es/servicios/tamano-y-distribucion-de-tamanos-de-particula.html>, consultado en julio del 2013.

[67] <http://www.nitcharacter.com/es/servicios/tamano-y-distribucion-de-tamanos-de-particula/dls.html>, consultado en julio del 2013.

[68] <http://www.nitcharacter.com/es/servicios/tamano-y-distribucion-de-tamanos-de-particula/tem.html>, consultado en julio del 2013.

[69] <http://www.nitcharacter.com/es/servicios/tamano-y-distribucion-de-tamanos-de-particula/sem-tamano-y-distribucion.html>, consultado en julio del 2013.

[70] De Silva, P. S., & Glasser, F. P. “Phase relations in the system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O relevant to metakaolin-calcium hydroxide hydration”. (1993).

[71] Galan Huertos E., “El caolín en España, características, identificación y ensayos cerámicos”, Edit. Soc. Española de cerámica y vidrio (1974).

[72] Kakali G., Perraki T., Tsvilis S., Badogiannis E. “Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity”. Applied Clay Science 20, 2001. Pag. 73-80.

[73] Shvarzmana A., Kovler K., Grader G.S., Shter G.E. “The effect of dehydroxylation/ amorphization degree on pozzolanic, activity of kaolinite”, Cement and Concrete Research 33, 405–416. 2003.

[74] Salvador S., “Pozzolanic properties of flash calcined kaolinite: a comparative study with soak – calcined products”, Cement and concrete research, 25, 102-112. Año 1995.

[75] Frias, M. Cabrera J. “Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C”. Cement and concrete research 31, 2001 , 519-527.

[76] Massaza F., “Pozzolana and Pozzolanic cements”. Lea’s Chemistry of cement and concrete, Chapter 10, 4ª Edición, Edit. Butterworth-Heinemann. 2004.

[77] P.E. Fraire-Luna, J.I. Escalante-García, A. Gorokhovskiy, “Composite systems fluorgypsum–blastfurnance slag–metakaolin, strength and microstructures”, Cement and Concrete Research 36 (2006) 1048–1055.

[78] <http://www.termolita.com/portal/index.php/nosotros/perlita-mineral>, consultada en Julio del 2013.

[79] Cabeza LF, Casellon C, Nogues M, Medrano M, Leppers R, Zubillaga O. “Use of microencapsulated PCM in concrete” walls for energy savings 39, 2007: 113–119.

- [80] Demirbog̃a R, Gũl R (2003) "Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures". *Energy Build* 35(11): 1155–1159.
- [81] Demirbog̃a R, Gũ I R (2004) "Durability of mineral admixture lightweight aggregate concrete". *Indian J Eng Mater Sci* 11(3):201–206.
- [82] Yilmazer S, Ozdeniz MB (2005) "The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates". *Build Environ* 40(3):301–342.
- [83] Mladenovic A, Suput JS, Ducman V, Skapin AS (2004) "Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates". *Cem Concr Res* 34:1809–1816.
- [84] Topcu IB, Isikdag B (2008) "Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete". *J Mater Process Technol* 204(1–3):34–38.
- [85] Torres ML, Garcí-a-Ruiz PA (2009) "Lightweight pozzolanic materials used in mortars: evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption". *Cem Concr Compos* 31:114–119.
- [86] Instituto Mundial del Carbón. "El carbón como recurso, una visión general del carbón". Reino Unido: Instituto Mundial del Carbón, 2005.
- [87] R. Soto Salazar, C.P. Barrios-Durstewitz, E. E. Saenz Angulo, R. E. Núñez-Jaquez, M.A. Baltazar-Zamora, E.E. Maldonado-Bandala, F. Almeraya Calderón, J.H. Castorena-González. "Protección catódica por corriente impresa del acero de refuerzo utilizando un ánodo de pasta de cemento conductor". V Congreso nacional ALCONPAT, Los Mochis, Sinaloa, México, 2012. P 273-280.
- [88] R. Soto-Salazar, C. Fong Guerrero, C.P. Barrios Durstewitz, R.E. Núñez Jaquez, J.H. Castorena, F. Almeraya, C. Gaona T. "Desempeño de un ánodo base cemento en la re-alkalinización electroquímica del concreto carbonatado". V Congreso nacional ALCONPAT, Los Mochis, Sinaloa, México, 2012. P 75-83.
- [89] Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR, Comité Ejecutivo Nacional 2007-2010, "Estadísticas de la Caña de Azúcar - Consolidado Nacional 2000-2009".
- [90] Cordeiro C. Toledo R. Tavares L. Fairbairn E. "Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars". ELSEVIER. Pg. 410, (2008).
- [91] Cordeiro G., Dias Toledo F., Rego Fairbairn E., "Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios", *Quim. Nova*, Vol. 32, No. 1, Pg. 82-86, (2009).
- [92] Martirena, J. F., y otros. 1998. "Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana". 1998.

[93] Rodríguez Bucio, José Luis. "Cenizas de origen orgánico: su efecto sobre las propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento". Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil. Morelia, Michoacán, México. Febrero del 2012.

[94] Bernabé Reyes, Cipriano. "Adiciones minerales de alta temperatura a morteros de cemento como modificadores de comportamiento físico-mecánico". Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil. Morelia, Michoacán, México. Febrero del 2012.

[95] ArcelorMittal. "Generacion de escorias en las acerías". Lazaro Cárdenas. 2011.

[96] F. Puertas. "Escorias de Alto Horno: composición y comportamiento hidráulico". CSIC Avierto, 1993. Pp.37-47.

[97] Núñez Hurtado, José Antonio. "comportamiento físico - mecánico de morteros de cemento con sustitución de ceniza y material orgánico en diferentes porcentajes". Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil. Morelia, Michoacán, México. Enero del 2013.

[98] Torres, A. "Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosion para acero de refuerzo en concreto", Publicacion Tecnica #328, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Mexico, 2010.

[99] Morales Garibay, M. "Desempeño mecánico de morteros de cal adicionados con fibras deshidratadas en polvo de cactus opuntia" Tesis de licenciatura. Morelia, Michoacan, Mexico.Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 2009.

[100] Diaz Gonzales, N. "efecto del agregado grueso pétreo triturado en solicitaciones mecánicas dinámicas y estáticas. Caso de concreto hidráulico simple adicionado con fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco". Tesis de licenciatura. . Morelia, Michoacan, Mexico: facultad de ingenieria civil, UMSNH. 2011.

[101] Andres y Celis, C. "Mejora de la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas", Publicacion Técnica #326, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, 2010.

[102] Shetty, M. S. "Concrete Technology Theory and Practice". India. S. Chand and Campanu LTD., Ram Nagar, New Dheli, 2005.

[103] Gjørv OE. "Durability design and construction quality of concretes tructures". In: Oh BH, Sakai K, Gjørv OE, Banthia N, editors. Proceedings of fourth international conference on concrete under severe conditions—environment and loading, vol.1, Seoul, Korea: Seoul National University and Korea Concrete Institute; 2004.p.44–55.

[104] Andrade C. "The limit of service life of concretes tructures". In: Encontro Nacional Betao Estrutural 2004, Porto: FEUP; 2004. p.1–25.

*Mauricio Arreola Sánchez*



- [105] Sengul O, Gjrv OE. Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. *ACI Materials Journal* 2008;106(6).
- [106] Polder R. "Test methods on site measurement of resistivity of concrete—a RILEM TC 154 technical recommendation". *Construction and Building Materials* 2001;V(15):125–31.
- [107] Ferreira RM, Liu G, Nilsson L, Gjrv OE. "Blast-Furnace slag cements for concrete durability in marine environment". CONSEC 04, fourth international conference on concrete under severe conditions: environment and loading, Seoul, Korea, June 27-July 1, 2004. pp. 109–116.
- [108] Polder R, Andrade C, Elsener B, Vennesland J, Gulikers J, Weidert R, et al. "RILEM TC 154-EMC: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion". *Materials and Structures* 2000;33:603–11.
- [109] Schickert M, Krause M. "Ultrasonic techniques for evaluation of reinforced concrete structures". In: Maierhofer C, Reinhardt HW, Dobmann D, editors. *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures vol.2 Nondestructive Testing Methods*; 2010 [chapter22].
- [110] H.W. Reinhardt, C.U. Grosse, "Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete", *Constr. Build. Mater.* 18 (3) (2004) 145–154.
- [111] N. De Belie, C.U. Grosse, J. Kurz, H.W. Reinhardt, "Ultrasound monitoring of the influence of different accelerating admixtures and cement types for shotcrete on setting and hardening behaviour", *Cem. Concr. Res.* 35 (11) (2005) 2087–2094.
- [112] C.U. Grosse, H.W. Reinhardt, M. Krger, R. Beutel, "Ultrasonic through-transmission techniques for quality control of concrete during setting and hardening", in: H.W. Reinhardt (Ed.), *Advanced Testing of Fresh Cementitious Materials*, Stuttgart, 2006, pp. 83–93.
- [113] H.K. Lee, K.M. Lee, Y.H. Kim, H. Yim, D.B. Bae, "Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete", *Cem. Concr. Res.* 34 (4) (2004) 631–640.
- [114] C. L. Hwang, D.-H. Shen, "The effects of blast-furnace slag and fly ash on the hydration of Portland cement", *Cem. Concr. Res.* 21 (4) (1991) 410–425.
- [115] G. Ye, P. Lura, K. van Breugel, A.L.A. Fraaij, "Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement", *Cem. Concr. Compos.* 26 (5) (2004) 491–497.
- [116] T. Voigt, C. Grosse, Z. Sun, S.P. Shah, H.W. Reinhardt, "Comparison of ultrasonic wave transmission and reflection measurements with P- and S-waves on early age mortar and concrete", *Mater. Struct.* 38 (282) (2005) 729–738.
- [117] A.M. Neville, "Properties of Concrete", Longmen, Essex, 1995.

[118] H. Taylor, "Cement Chemistry", Thomas Telford Publishing, London, 1990.

[119] Nicolas Robeyst, Elke Gruyaert, Christian U. Grosse, Nele De Belie, "Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity". *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 1169–1176.

[120] AFPC-AFREM, "Concrete durability: determination of apparent density and water accessible porosity" (in French), 1997; 121–5.

[121] MarcGoueygou, Zoubeir Lafhaj, Fethi Soltani. "Assessment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves". *NDT&E International* 42 (2009) 353–360.