



Universidad Nacional Autónoma de México
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros
hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA:
EDREY NASSIER SALGADO CRUZ

Director de Tesis
Dr. Alberto Muciño Vélez
Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje.

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. Septiembre de 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TESIS DE MAESTRÍA

SIEMBRA DE PARTÍCULAS SUB MICROMÉTRICAS DE MINERALES DE FÓSFORO EN MORTEROS HIDRÁULICOS DE CEMENTO PARA MEJORAR SU DESEMPEÑO MECÁNICO.

Ing. Edrey Nassier Salgado Cruz.

Ing. **EDREY** NASSIER SALGADO † Dr. **ALBERTO** MUCIÑO

PROCESO DE TESIS + DOCUMENTO DE PROYECTO

Para la obtención del grado en Maestría en Arquitectura - Tecnología



Universidad Nacional Autónoma de México
Programa de Posgrado y Maestría en Arquitectura
Campo de conocimiento: Tecnología
Ciudad de México, 2016.



Los nombres comerciales que aparecen en esta investigación son marcas registradas de sus respectivos propietarios.



Las imágenes que aparecen en este trabajo de investigación se utilizan con derecho de copyleft de Creative Commons o son de libre circulación en internet y exclusivamente con fines académicos y sin fines de lucro.

Universidad Nacional
Autónoma de México



Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico.



Ing. **EDREY** NASSIER SALGADO † Dr. **ALBERTO** MUCIÑO



El trabajo de investigación y experimentación realizado en la Tesis de Maestría en Arquitectura, campo de conocimiento en tecnología cuyo título es; **“Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico.”**, que presenta el Ingeniero Civil Edrey Nassier Salgado Cruz, se realizó en las instalaciones del **Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales** del Instituto de Física perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la dirección de los Doctores:

Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza, asesor científico y técnico del proyecto por el Instituto de Física de la UNAM.

Dr. Alberto Muciño Vélez, asesor técnico por la facultad de arquitectura de la UNAM.

COMITÉ ASESOR



Director de tesis

1.- **Dr. Alberto Muciño Vélez**; Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje (CIAU). Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura. UNAM.

Co-director de tesis

2.- **Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza**; Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales, Instituto de Física UNAM.

Co-director de tesis

3.- **Dra. Gemma Luz Sylvia Verduzco Chirino**; Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura. UNAM.

Sinodal

4.- **Dr. Lauro Bucio Galindo**; Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales, Instituto de Física. UNAM.

Sinodal

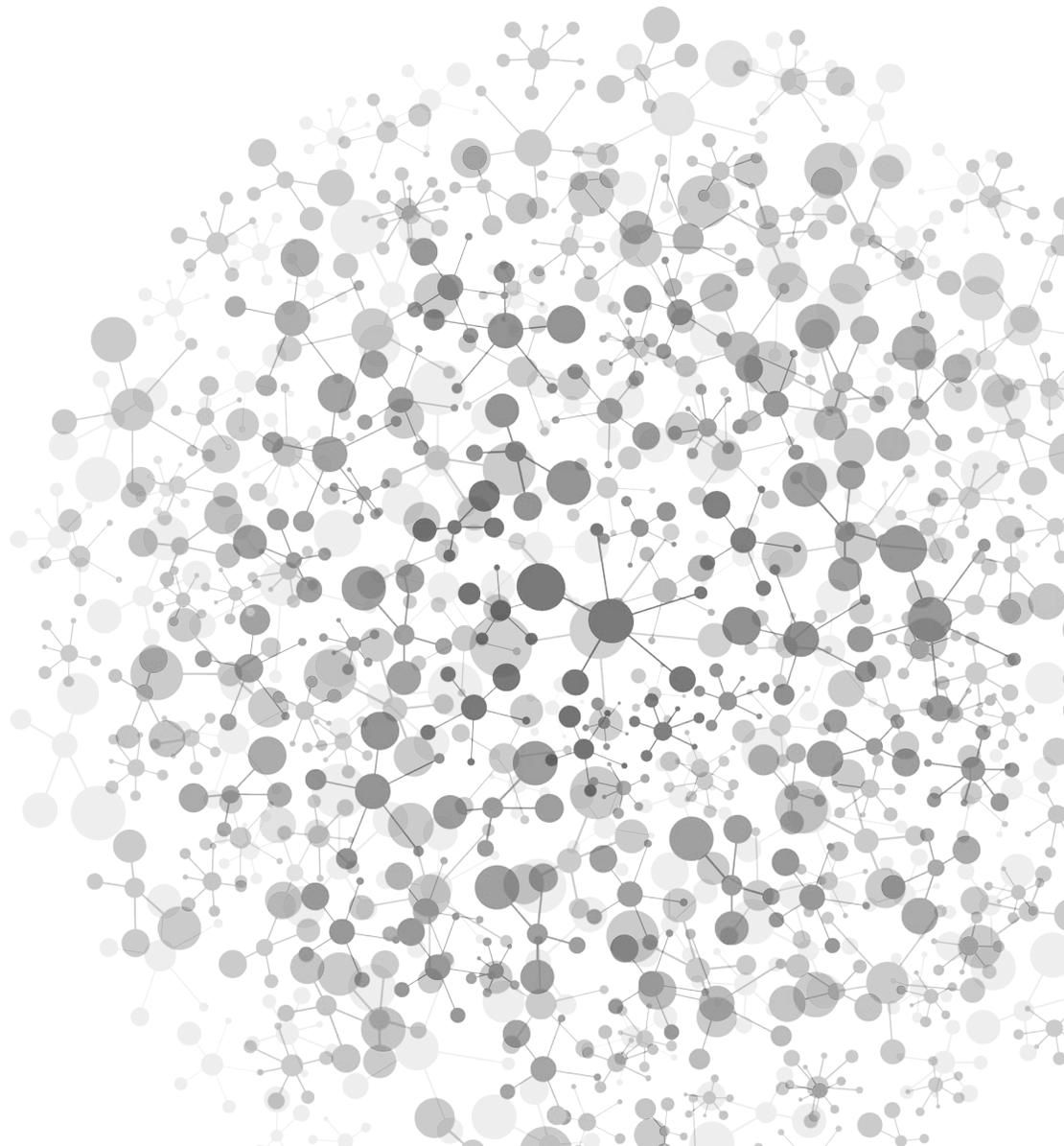
5.- **Dr. Humberto Acedo Espinoza**; Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura. UNAM.

“You can teach a student a lesson for a day; but if you can teach him to learn by creating curiosity, he will continue the learning process as long as he lives”

Clay P. Bedford

DEDICATORIA

A Dios, mi familia y amigos.



AGRADECIMIENTOS...

Es muy complejo y difícil, dedicar y agradecer a todas aquellas personas que intervinieron de alguna u otra manera en la elaboración de este trabajo de tesis de investigación de maestría, sobre todo, cuando tienen que ver en la evolución que estos años le han traído a mi vida. Me esforcé por mencionarlos de manera breve, ya que ni escribiendo mil páginas podría agradecerles todo lo que me han brindado. Pero esto no significa que el agradecimiento y reconocimiento que le profesó a cada uno sea liliputiense.

Es así, que en estos momentos la palabra gracias no parece suficientemente justa para expresar mi admiración, cariño y respeto a todas esas personas que de alguna manera han contribuido a que esta tesis de investigación llegue a su culminación. Es por eso, que más que agradecerles les doy el debido reconocimiento por ser quienes son, enseñarme lo mejor de ustedes y por lo que cada uno, ha influido en mí y en lo que actualmente soy.

Y haciendo referencia nuevamente, una Tesis de Maestría nunca es fruto del trabajo de una sola persona, aunque sea una sola la que la firma con su nombre. Por este motivo, cuando se acaba su redacción, surge inevitablemente el deseo de dar gracias.

En mi posición teísta agnóstica le doy gracias a DIOS.

Mis dos superhéroes Elidía Cruz Serrano y Ramón Salgado Ochoa, guías, amigos, confidentes. Mis padres. Los que me han ensañado lo hermoso de la vida, el respeto, amor, valor, lealtad, amistad.

A mis hermanas Talía Azucena, Tere, Paz, July y Viri. A mis hermanos Estanislao, Víctor y Agustín. Mis sobrinos, Monse, Fer, Alfonso, Emi, Josè. A mis cuñados Joaquín, Aza, Alex, y mi cuñada Lili. Mi familia. Parte fundamental de mi ser, de mi vida y mi motivación diaria. Este logro es tan suyo como mío.

AGRADECIMIENTOS...

A mi asesor y amigo, Doctor Alberto Muciño Vélez, por ser el mejor guía en estos años y por mostrarme caminos alternativos en la construcción y la arquitectura, alentando a forjar mi propia disertación, que a la postre no es solo una postura profesional, sino, un pensamiento de vida. Gracias por enseñarme a cuestionar la arquitectura estándar, por fomentarme la crítica y la autocrítica, por enseñarme que la buena práctica va sustentada de una buena teoría. Esta tesis no se hubiera logrado sin sus valiosos conocimientos otorgados hacia mi persona.

Al Doctor Eligio Orozco Mendosa por todo el conocimiento transmitido en estos años, así como por el apoyo otorgado en la elaboración de la parte experimental de esta tesis, sin su ayuda y guía esto no se realizaría. Gran persona, gran científico, un privilegio trabajar bajo su mando.

A la Dr. Gemma Verduzco Chirino y Dr. Lauro Bucio Galindo, por dejarme expresar y reforzar el conocimiento en cada momento, por enseñarme que el conocimiento es una de las razones por las que el ser humano es tan grande.

Cualquier persona que te motiva a ser mejor día a día y está allí para que lo logres es definitivamente alguien que vale la pena tener su amistad por siempre, muchas gracias Sofia B.V. L.

A mis amigos del Laboratorio de Cristalografía y Materiales Naturales del Instituto de Física, Dr. Jacobo, Ángel, Dra. Nora, Dra. Joshiamin, Erendida, Gaby, Lety, Germain. Mil gracias por todo el apoyo y ayuda recibida, trabajar a su lado hace que el trabajo sea simplemente fantástico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la ayuda económica brindada. Al fondo sectorial CONACYT - SECRETARÍA DE ENERGÍA – SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA con número de proyecto 260155 con título “LABORATORIO PARA LA ENSEÑANZA DE LA EDIFICACIÓN SUSTENTABLE”.

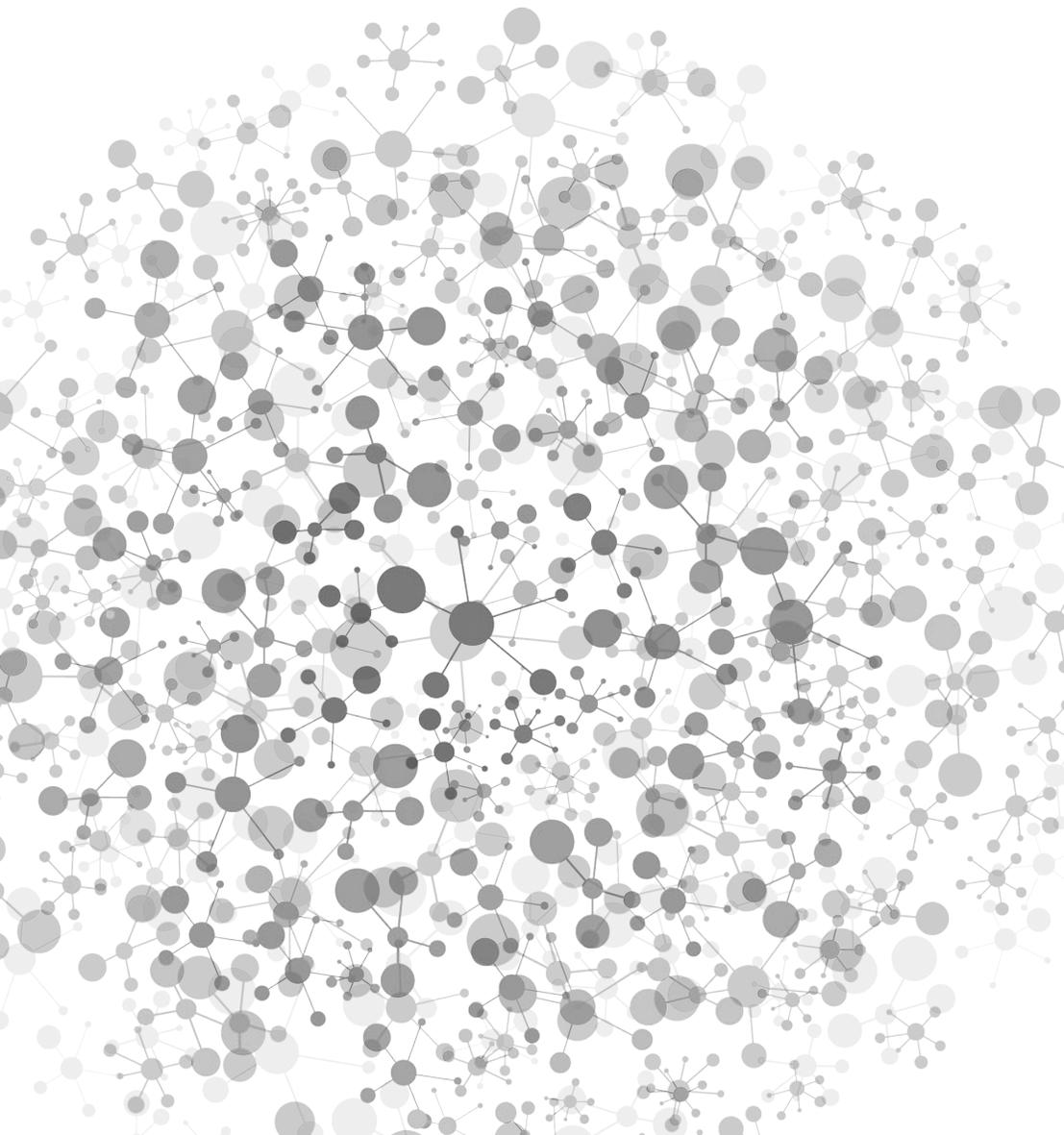
Al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la UNAM, por darme la oportunidad de generar nuevos temas que le competen a tecnologías en materiales aplicados a la construcción.

Finalmente a mis amigos, compañeros de clase, profesores, tutores y a la máxima casa de estudios la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

MUCHAS GRACIAS.

Te suplico, oh César, a ti y a cuantos leyeren esta obra, que se me perdone si alguna cosa en la exposición fuera poco acorde con las normas de la escritura literaria. Pues no me esforcé en escribirla como perfecto filósofo, retórico elocuente, o gramático distinguido, puntual en los preceptos del arte, sino como arquitecto.”

Marco Vitruvio Polión (en latín Marcus Vitruvius Pollio; 80–70 a.C. - 15 a.C.)



Í N D I C E

INTRODUCCIÓN14

1 CAPÍTULO

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....18

Antecedentes	18
Planteamiento del problema	22
Justificación	26
Origen del proyecto	27
Objetivos	28
Hipótesis	29

32..... MARCO CONCEPTUAL

2.1 Definición de Mortero	32
2.2 Estructura del Mortero	34
2.2.1 Fase – pasta de cemento	34
2.4.2 Fase – de transición	46
2.4.3 Fase – agregados o aglomerados	48

2 CAPÍTULO

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL60

3.1. Método del trabajo de investigación	60
3.2. Materiales empleados	62
3.3 Obtención de partículas sub micrométricas	64
3.4 Elaboración de las mezclas	66
3.5 Probetas para microscopia electrónica de barrido	70
3.6 Técnicas de caracterización	72

3 CAPÍTULO

80..... ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis de resultados	80
4.2 Conclusiones	116

4 CAPÍTULO

REFERENCIAS
| PÁGINA 119 |

GLOSARIO
| PÁGINA 126 |

ANEXOS
| PÁGINA 129 |







INTRODUCCIÓN

Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico.



Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico.

Introducción

Los materiales generados a base de cemento son sin duda los más antiguos fabricados para su uso en la industria de la construcción, y en la actualidad, son los materiales de construcción predominantes en todo el mundo, su producción esta muy por delante del de acero, madera, asfalto, polímeros y otros. Su creación se remonta por lo menos 9000 años cuando se usó un Mortero como sistema de piso, el cual fue descubierto en Israel¹. Siendo las puzolanas para hacer mezclas de Morteros, de los primeros materiales cementantes en ser utilizados por los romanos y griegos, este material fue descrito por Vitruvius² alrededor del año 27 a.C. como:

“También hay una especie de polvo que por causas naturales produce resultados sorprendentes. Se encuentra en el barrio de Baiea y alrededor del monte Vesubio. Esta sustancia, cuando se mezcla con cal y escombros, no sólo da fuerza a los edificios, sino también a los muelles que se construyen en el mar y endurecen bajo el agua”.

Sin embargo según Mehta (2002)³, la industria del concreto es actualmente la que mayor usa recursos naturales en el mundo, y por lo tanto tiene un impacto ambiental considerable. Cada tonelada de Cemento Portland requiere alrededor de 1.5 toneladas de materias primas para su producción, y consume alrededor de 4000 a 7500 megajouls de energía. Otro factor

1 Malinowski, R. y Garfinkel, Y., (1991), ‘Prehistory of concrete’, Concrete Institute., Vol 13 (3), Pag. 62–68

2 Vitruvius, The Ten Books of Architecture, Bk II, Ch. VI (New York, Dover, 1960), pp. 46–7.

3 Mehta, P.K., (2002), ‘Greening of the concrete industry for sustainable development’, Concrete. Institute., 24 (7), 23–28.

importante de contaminación son los procesos de producción para la generación del Cemento Portland los cuales implican una generación excesiva de gases de efecto invernadero, ya que cada tonelada de cemento producida genera la liberación a la atmósfera de alrededor de una tonelada de dióxido de carbono (CO₂). La industria del cemento es entonces responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones globales de CO₂⁴.

Aparte de la contaminación provocada por la generación del cemento, la presencia de algunas sustancias en el concreto, incluido el gran uso de aditivos, ha planteado algunos problemas de salud. Elementos radiactivos naturales como el K¹⁹, uranio [U], y el torio [Th] pueden estar presentes en varias concentraciones en viviendas de concreto, dependiendo de la fuente de las materias primas usadas en la mezcla⁵.

Por lo tanto, para que la industria del concreto permanezca sin agredir al medio ambiente y la salud humana, debe someterse a algunos cambios significativos en la forma en que se especifica, produce, utiliza y se recicla el concreto⁶.

Es así, que en la presente investigación proponemos una respuesta a través de la nano ciencia en materiales a la problemática anterior, al utilizar aditivos naturales hechos a partir de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo de origen natural, para mejorar el desempeño mecánico de mezclas de Morteros elaboradas con cementos hidráulicos, consiguiendo la disminución del empleo de materias primas para la elaboración del concreto y/o Mortero y en consecuencia un mejor desempeño con menores efectos contaminantes en la industria de la construcción hacia el medio ambiente.

4 Mehta, P.K., (1999), 'Concrete technology for sustainable development', Concrete. Intitute., 21 (11), 47–53.

5 Consultado el 20 de noviembre de 2015 en http://www.luminultra.com/dmdocuments/Product%20Validation%20-%20Cement_Concrete%20Admixtures%20QGOM.pdf

6 Holland, T.C., (2002), 'Sustainability of the concrete industry – what should be ACI's role?', Concrete. Int., 24 (7), 35-40.



“

La arquitectura moderna no significa el uso de nuevos materiales, sino utilizar los materiales existentes en una forma más humana.”

Alvar Ballo.



C A P Í T U L O

1

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico.





Capítulo 1.

Planteamiento de la investigación

Antecedentes

La presente preocupación de la ciencia respecto al cambio climático y los efectos que éste tiene sobre el planeta ha permitido que varias investigaciones se enfoquen en obtener materiales que generen menos contaminantes en su propia elaboración, siendo el sector de la construcción uno de los más preocupados por desarrollar nuevos materiales que sean menos nocivos, con mejores funciones y cualidades. Actualmente en este sector se emplean materiales que en sus etapas de extracción y elaboración suelen ser altamente contaminantes, tales como el aluminio, el acero y el concreto, siendo este último, conformado por materiales no renovables como son los agregados y el agua; además de la producción de materiales peligrosos para el medio ambiente como lo el cemento y los aditivos, que principalmente son compuestos químicos.

Sin embargo se han realizado estudios e investigaciones sobre materiales con procedencia de elementos naturales los cuales al ser calcinados tienen una gran capacidad puzolánica⁷, por ejemplo la ceniza de bagazo de caña, la ceniza de cascara de cacahuete, de la hoja de plátano, de la cascara de arroz y de la cascara de café entre otros; los cuales al ser incorporados a las mezclas de cementos, Morteros y concretos tienen efectos

⁷ El código ASTM (1992), en la definición 618-78, define: “las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos donde predomina el componente amorfo que por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han molido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes”.

en las propiedades físicas, químicas y mecánicas de estos materiales. A continuación, se describen brevemente algunas de las investigaciones que tratan sobre la adición de materiales naturales incorporados a la fabricación de pastas de cemento, mezclas de Morteros y concretos.

Piyanut (2012)⁸ estudió los efectos de la Ceniza Fina de Bagazo de Caña (SCBA por sus siglas en inglés) con tamaño menor a 45 micras, y su efecto en la trabajabilidad y la resistencia a la compresión de Morteros. Los resultados obtenidos por Piyanut indican que la sustitución de clinker con un 20% de SCBA es apropiado para la producción a escala de laboratorio y con una relación w/c (agua/cemento) de 0.735 se obtiene la adecuada trabajabilidad en sus mezclas realizadas.

Arboláez y Griffin (2005)⁹ generaron un estudio sobre la evaluación de la hoja de maíz como posible fuente de material puzolánico en sustitución parcial del cemento Portland a emplear en las obras de construcción para la elaboración de Morteros y concretos, evaluando las características físicas y químicas del material, así como algunas de sus propiedades principales desde el punto de vista constructivo, entre las que destacan la resistencia a la compresión y la durabilidad, concluyendo que el material en estudio posee grandes potencialidades de ser empleado con estos fines, en reemplazos no mayores del 20% de cemento.

A su vez Mahmoud et al. (2012)¹⁰ generan una investigación sobre la ceniza de cáscara de cacahuate para utilizarla como reemplazo de cemento en la producción de bloques elaborados con arena y cemento, llegando a la conclusión de que la ceniza de cáscara de cacahuate en menos de un 20% de material puede ser utilizada como reemplazo de cemento, sin embargo el requerimiento de agua para una buena consistencia y fluidez en el Mortero aumenta.

Kanning et al. (2014)¹¹ generan una investigación sobre la ceniza de hojas de plátano

8 Piyanut, M. et al. (2012) *Effects of Fine Bagasse Ash on the Workability and Compressive Strength of Mortars*. Chiang Mai Journal of Science, 40(1): 126-134.

9 Arboláez, I. A. y Griffin M. S. (2005). Evaluación de la hoja del maíz como posible fuente de material puzolánico. *Tecnología y construcción*. 21 (3), pp: 09-18.

10 Mahmoud, H. et al. (2012). *Groundnut shell ash as a partial replacement of cement in sandcrete blocks production*. International Journal of Development and Sustainability. 1 (3), pp: 1026-1032.

11 Kanning et al. (2014). *Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement*. Construction and Building Materials. 54, pp: 460-465.



como puzolanas en el Cemento Portland para la fabricación de Morteros y concretos. Mostrando resultados en los que la resistencia a la compresión, hasta con un 10% de ceniza en la mezcla de Mortero, obtuvo casi 25% más resistencia a la compresión que la muestra de referencia y aproximadamente 10% mayor resistencia a la flexión. Concluyendo que las cenizas de hoja de plátano (BLA por sus siglas en inglés) pueden ser utilizadas como material puzolánico en obras civiles, con ventajas tales como costos más bajos y la reducción equivalente en los impactos ambientales resultantes de la acumulación de este tipo de residuo en el campo.

Chanu y Devi (2013)¹² en su trabajo *Contribución de la Ceniza de Cáscara de Arroz* (RHA por sus siglas en inglés) *a las Propiedades del Cemento, Mortero y Concreto*, realizaron mezclas con reemplazo parcial del cemento, estudiando las propiedades mecánicas del material, llegando a la conclusión de que la sustitución parcial del cemento con RHA reduce la penetración de agua en el concreto por acción capilar en un 20%, además del aumento de la fuerza a la compresión.

Como podemos apreciar a partir de la investigación científica básica y aplicada, se ha mostrado el potencial que tienen estos materiales en la industria de la construcción. En México la investigación aún no es significativa, no obstante, se ha generado un gran interés por estos temas; por ejemplo en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Veracruzana, Jaén (2011)¹³ presenta la tesis titulada *Comportamiento mecánico y físico del Mortero a base de CBCA (Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar) como árido en aplanados en muros*, generando aplanados para muros con 50 y 100% de reemplazo de ceniza de bagazo de caña como agregado, en lo que concluyó que a más ceniza de bagazo de caña la resistencia a la compresión disminuía debido a la porosidad que genera este material, ya que la densidad de las cenizas es menor a la de la arena.

Por su parte Reyes (2007)¹⁴ en su tesis *Caracterización de la reactividad puzolánica*

12 Chanu, N. M. y Devi, Th. K. (2013). *Contribution Of Rice Husk Ash To The Properties Of Cement Mortar And Concrete*. International Journal of Engineering Research & Technology. 2 (2), pp: 1-7.

13 Jaén, U.H. (2011). *Comportamiento mecánico y físico del mortero a base de CBCA como árido en aplanados en muros*. Tesis de Especialidad. Mexico, Universidad Veracruzana, Facultad de ingeniería civil.

14 Reyes, J. M. (2007). *Caracterización de la reactividad puzolánica de materiales de origen natural, industrial y desperdicio agrícola*. Tesis de maestría. México, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Unidad Oaxaca,

de materiales de origen natural, industrial y desperdicio agrícola, evaluó la reactividad puzolánica de diferentes materiales como son la ceniza de pergamino de café de Huautla de Jiménez, Oaxaca, Ceniza Volátil, y una arcilla regional del estado de Puebla, así como el estudio de su microestructura en pastas de cemento y Mortero, además de evaluar su resistencia mecánica a la compresión en 1, 3, 7, 14 y 28 días; llegando a la conclusión de que la ceniza de pergamino de café tiene poco o nulo valor puzolánico y que la arcilla estudiada generó un impacto positivo en la prueba a compresión.

Espinoza (2014)¹⁵ de la Universidad de Querétaro en su tesis titulada *Mejoramiento de las propiedades mecánicas de concretos puzolánico para incrementar su resistencia ante ataques de sulfatos*, empleó tres materiales de desecho de la industria como lo son la ceniza de bagazo de caña, la ceniza de cascara de arroz y la piedra pómez como material de reemplazo en el cemento, en porcentajes del 10, 20 y 30% en mezclas de Mortero, evaluando su resistencia a la compresión a edades de 28, 60 y 100 días, concluyendo que las mejores propiedades mecánicas fueron observadas en la mezcla de ceniza de cascara de arroz en un porcentaje de 20% de reemplazo de cemento.

De esta manera y debido a los problemas medioambientales y la difícil obtención del Cemento Portland, nuevos campos de investigación en materiales de carácter natural han sido investigados para su utilización como aditivos o reemplazo de cementos y su utilización en el ámbito de la construcción, tal es el caso de los biocerámicos.

Los trabajos de Tay (2007)¹⁶ así como de Gandolfi et al. (2008)¹⁷, Lin et al. (2009)¹⁸ y Abmed et al. (2014)¹⁹, muestran investigaciones aplicando biocerámicos para elaborar Cementos aplicados en la odontología, que si bien no son cementos utilizados en la construcción sí presentan similitudes en sus fases de hidratación que las de un Cemento

15 Espinosa, C. G. (2014). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas de concretos puzolánicos para incrementar su resistencia ante ataques de sulfatos*. Tesis de Maestría. México, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería.

16 Tay, R.F. et al. (2007). *Calcium Phosphate Phase Transformation Produced by the Interaction of the Portland Cement Component of White Mineral Trioxide Aggregate with a Phosphate-containing Fluid*. American Association of Endodontists.. 33 (11), pp: 1347-1351.

17 Gandolfi, G.M. et al. (2008). *New Portland Cement-based Materials for Endodontics Mixed with Articaïne Solution: A Study of Cellular Response*. Journal of Endodontists. 34 (1), pp: 39-44.

18 Lin, K. L. et al. (2009). *Influence of phosphate of the waste sludge on the hydration characteristics of eco-cement*. Journal of Hazardous Materials. 168, pp: 1105-1110.

19 Abmed, A.H.M. et al. (2014). *Cell Attachment Properties of Portland Cement-based Endodontic Materials: Biological and Methodological Considerations*. Journal of endodontics. 40 (10). pp:1517-1523.



Portland Ordinario.

Finalmente podemos concluir que los materiales cerámicos biocompatibles aplicados en el sector de la construcción tienen una gran expectativa debido a sus características físicas, químicas y mecánicas, las cuales pueden generar nuevas o mejores funcionalidades y cualidades en los Cementos que actualmente utilizamos en el sector de la construcción.

Planteamiento del problema

En los últimos años el ser humano se ha dado cuenta de la grave situación medio ambiental que nuestro planeta está padeciendo, generada por las desenfrenadas problemáticas de sobrepoblación, acumulación de basura, explotación de recursos naturales, emisión de contaminantes en aire, agua y suelo, haciendo de nuestro hábitat un lugar cada vez menos adecuado para la sobrevivencia de organismos vivos²⁰.

Debido a esto se ha generado una creciente preocupación por parte de la sociedad para mitigar estos problemas, estableciendo tópicos como el de sustentabilidad.

En la conferencia llevada a cabo en Brundtland (1978) titulada *Nuestro común destino*, se definió a la sustentabilidad como “el satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para atender sus propias necesidades”²¹, tema amplio y complicado, basado en tres principios fundamentales: ecológico, económico y social, los cuales tienen a su vez diversas variables que hacen difícil su medición.

Otro acontecimiento importante que fortalece el esfuerzo de la disminución de

²⁰ En el quinto reporte de evaluación realizado el 2 de noviembre del 2014 por las Naciones Unidas los expertos en cambio climático establecieron; “La influencia humana sobre el clima es claramente antropogénico (El término antropogénico, a veces llamado antrópico, se refiere a los efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas, a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana), siendo las emisiones de efecto invernadero las más altas en la historia”. Los cambios climáticos se han extendido su impacto al medio ambiente y a la humanidad. En la última década la atmosfera y océanos se han vuelto más calientes, la cantidad de nieve y hielo ha decrecido y el nivel del mar ha aumentado.

²¹ Comisión Brundtland 1987 El informe fue elaborado por distintas naciones en 1987 para la ONU, por una comisión encabezada por la doctora Gro Harlem Brundtland, entonces primera ministra de Noruega. Originalmente, se llamó *Nuestro Futuro Común (Our Common Future, en inglés)*. En este informe, se utilizó por primera vez el término desarrollo sostenible (o desarrollo sustentable). Implica un cambio muy importante en cuanto a la idea de sustentabilidad, principalmente ecológica, y a un marco que da también énfasis al contexto económico y social del desarrollo.

contaminación en el planeta, fue el Protocolo de Kyoto, generado el 11 de diciembre de 1997 en Kyoto, Japón y que entró en vigor el 16 de febrero de 2005, en este acuerdo se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los principales países industrializados con el fin de que del año 2008 al año 2012 dichas emisiones descendiesen en 1.8%.

En el año 2007 Europa creó una estrategia llamada “20-20-20 targets” (ver Figura 1) en la cual los puntos importantes a tratar eran las energías renovables, eficiencia energética y la emisión de gases que provoca el efecto invernadero, temáticas importantes para hacer frente al cambio climático. La estrategia tiene tres objetivos específicos con una meta para el año 2020:

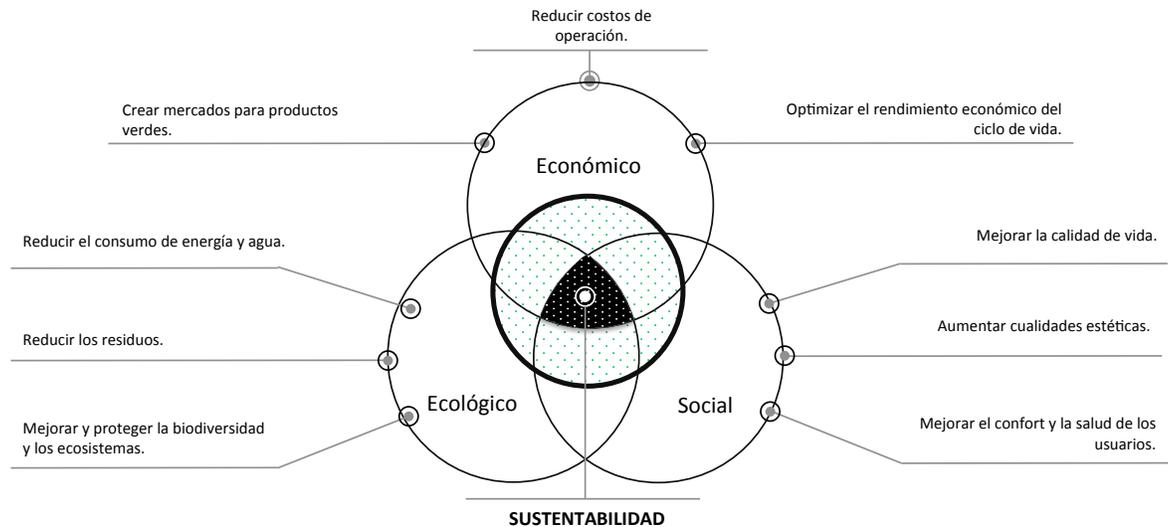
-20%	+20%	+20%
Reducciones de gases que provocan el efecto invernadero en la Unión Europea.	Incremento de la Eficiencia Energética en la Unión Europea.	Aumento de la participación en el consumo de energía producida por fuentes renovables.

▲ **Figura No. 1.-** Estrategia 20-20-20 creada en Europa la cual se plantea tres puntos importantes para disminuir la contaminación medio ambiental.

En este contexto la construcción —la cual es un sector vital en el desarrollo de cualquier nación— toma un rol importante debido al deterioro que ésta le causa al planeta. A pesar de ello, la construcción sustentable intenta cambiar parámetros en los cuales se minimice el daño causado por esta industria a los recursos y al medio ambiente (ver Figura 2).

En la sustentabilidad aplicada al sector de la construcción se presentan grandes retos y problemáticas, y aunque actualmente se tienen varios sistemas de certificación internacional que regulan la sustentabilidad en las edificaciones (LEED, BREEAM, GREEN STAR, CASBEE, entre otras) sus métodos conllevan en su análisis diversos aspectos como la gestión, transporte, terrenos, agua, energía, ambiente interior, diseño y materiales, otorgando una calificación que resulta difícil emitir debido a todos los factores que influyen en la concepción de una edificación.





▲ **Figura No. 2.-** Las tres dimensiones de la construcción sustentable, relacionando los beneficios que pueden ser obtenidos cuando el equipo de construcción y diseño genera un aprovechamiento íntegro en las primeras etapas de construcción de un proyecto. Extraído con fines didácticos de U.S. Environmental Protection Agency. (2009). Green Building Basic Information. ²².

A pesar de ello, la mayoría de las certificaciones existentes actualmente, hacen un enfoque más estricto y específico sobre la sustentabilidad en los procesos de ahorro de energía, dando menos importancia a aspectos importantes como son los materiales de construcción.

En una edificación de gran escala se utilizan cientos de toneladas de acero, aluminio, vidrio, polímeros y concreto, siendo este último el segundo material más utilizado en el mundo después del agua²³, el consumo del concreto oscila en un nivel de $10 \text{ km}^3 / \text{año}$ ²⁴, en comparación con 2 km^3 para la arcilla, 1.3 km^3 de la madera, y $0,1 \text{ km}^3$ de acero²⁵, ocasionando una gran repercusión en el medio ambiente debido a que, el cemento que es la materia prima del concreto, aporta aproximadamente del 5% al 7% de la emisión global de CO_2 al planeta en su proceso de fabricación²⁶ puesto que por cada tonelada de cemento fabricada también se produce una tonelada de dióxido de carbono²⁷. El dióxido de

²² U.S. Environmental Protection Agency. (2009). Green Building Basic Information.

²³ Gambhir, M.L (2006). *Concrete technology; Theory and practice*, New Delhi, fifth edition:McGraw-Hill

²⁴ Gartner, E. and Macphee, D. (2011). *A physico-chemical basis for novel cementitious binders*. Cement and Concrete Research. 41, pp: 736–49.

²⁵ Flatt, R., Roussel, N. and Cheeseman, C.R. (2012). *Concrete: an eco-material that needs to be improved*. Journal of the European Ceramic Society. 32, pp:2787–98.

²⁶ Federación Interamericana del Cemento. (2013). *Informe estadístico*.

²⁷ Domoterra. (2015), Fuente Electrónica de Información. Disponible en: <http://www.domoterra.es/>

carbono generado en la elaboración del cemento es principalmente debido a que la materia prima - rocas calizas y arcillas - contiene carbonato de calcio CaCO_3 , el cual parte de este compuesto se transforma en dióxido de carbono durante el proceso de calcinación.

Otro factor importante en la industria cementera es el alto consumo energético, que suele representar aproximadamente el 40 % de los costos de producción. Con el fin de proporcionar la demanda de energía térmica necesaria para el proceso de clinkerización se pueden emplear distintos combustibles fósiles convencionales y de residuos. En 2006, los combustibles más utilizados eran coque de petróleo, carbón y distintos tipos de residuos, seguidos por lignito y otros combustibles sólidos, petróleo, fuel oil y gas natural, los cuales también genera contaminación provocada por el CO_2 liberado²⁸.

Es así como el desarrollo de nuevas tecnologías creadas o aplicadas al sector de la construcción se basa principalmente en el estudio, análisis, generación y aplicación de materiales con mejores funciones y cualidades para que puedan ser empleados en procesos constructivos menos contaminantes.

Debido a lo anterior el Mortero hidráulico, el cual es un producto echo a base de cemento y uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción empleándose principalmente para el acoplamiento de paredes de mampostería y acabados en edificaciones, es objeto de estudio para su posible modificación de tal manera que se diseñe un material que trate de resarcir la contaminación por medio del empleo de aditivos naturales, utilizando en este caso minerales de fósforo de origen natural, que se aplica hoy en día en la fabricación de cerámicos, alimento para ganado, medicinas, fertilizantes, dentífricos, entre otros.

Un factor importante en esta investigación es la relación que existe en los materiales que constituyen al Mortero a escalas micrométricas como lo es el cemento, la arena y inclusión de minerales de fósforo, para tratar de generar u obtener mejores propiedades físicas, químicas y mecánicas, como lo es la resistencia a la compresión principalmente.

blog/2013/04/02/el-cemento-y-la-produccion-de-co2/, (Consultado el 20/08/2015)

28 Comisión Europea, Dirección General, CCI Centro Común de Investigación, Instituto de Prospectiva Tecnológica, Unidad de Consumo y Producción Sostenibles, Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación. (2010) *Prevención y Control Integrados de la Contaminación; Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio.*

De esta manera la importancia del estudio de los materiales toma gran interés cuando el ingeniero, arquitecto o constructor entiende, analiza y comprende el funcionamiento, comportamiento, estructura, síntesis y procesamiento de los materiales; debido a que sólo así podrá mejorar las prácticas constructivas utilizando tecnologías avanzadas y nuevos materiales.

Justificación

La industria de los materiales para la construcción juega un papel importante en la solución de problemas económicos y sociales. En el sentido de que los problemas del sector de la construcción son resueltos en una manera típica, es necesario adoptar materiales y tecnologías que minimicen el uso de escasas riquezas nacionales como lo son la energía y los recursos naturales. En esta tesis se plantea el empleo de aditivos provenientes de fosfatos minerales en mezclas de Mortero para disminuir el impacto relacionado con el consumo de energía y contaminación al medio ambiente.

De acuerdo a lo anterior el tema centrará su interés en el análisis químico y físico del comportamiento mecánico del material bajo estudio —un aspecto técnico ingenieril fundamental en la elaboración de Morteros aplicados a la construcción— y de su durabilidad, dependiendo ésta de tres fundamentos básicos:

1. Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento en la matriz endurecida, siendo factor fundamental el estudio y selección de un cementante adecuado a los requerimientos establecidos por la obra en la que el material actuara, una relación agua-cemento favorable y el uso de aditivos que puedan asegurar la calidad de la matriz cementante.
2. Las características técnicas de los agregados, los cuales deben cumplir y cubrir las funciones necesarias en la estructura, resistiendo adecuadamente las cargas y servicios durante su vida útil.
3. La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

Finalmente, la importancia de esta investigación se finca en la evaluación y factibilidad de la reactividad de materiales provenientes de minerales de fósforo de origen natural, así como su impacto benéfico en la elaboración de Morteros y sus beneficios en las propiedades y cualidades físicas, químicas y mecánicas, lo que en última instancia debe redundar en la disminución de la emisión de CO₂ debido al decremento de material cementante necesario en la mezclas para una misma resistencia a la compresión, creando así materiales más baratos debido a las materias primas utilizadas; y finalmente, creando investigaciones tecnológicas en materiales para aplicaciones arquitectónicas desde un punto de vista multidisciplinario.

Origen del proyecto

El tema de investigación surge de la necesidad de emplear nuevos materiales que traten de cumplir con aspectos sustentables para el desarrollo tecnológico de la industria de la construcción, establecido en los tres ejes que aparecen en la Figura 3.

MATERIALES	SUSTENTABILIDAD	TECNOLOGÍA
Empleo de nuevos materiales y su aplicación a la industria de la construcción.	Con la intención de disminuir la contaminación en la elaboración del material de construcción, ampliando su vida útil o de funcionamiento y con menores costos de producción.	Modificación de las características químicas, físicas y mecánicas de los materiales mediante la adición de partículas sub-micrométricas de minerales naturales

▲ **Figura No. 3.-** En resumen, el tema tratado en esta tesis tiene su fundamento en el empleo de materiales menos contaminantes para una mayor sustentabilidad de la industria de la construcción.

Como antecedente inmediato del tema que desarrollaremos, está la tesis titulada “*Endurecimiento de cementos tipo Portland inducidos por fosfatos y/o silicatos*” que A. Muciño elaboró bajo la dirección del Dr. E. Orozco en el Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales del IFUNAM y con la que obtuvo el grado de Doctor en Arquitectura en el 2015²⁹.

²⁹ Muciño, V.A. (2015). *Endurecimiento de cementos tipo Portland mediante fosfatos y/o silicatos*. Tesis de doctorado. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura.



En las conclusiones de esa tesis se establece que mediante la “*siembra de nano partículas de minerales naturales de fósforo y silicio*” en pastas de cemento tipo Portland se consigue incrementar su resistencia mecánica a la compresión en un 10% . En particular, se concluye que basta con agregar el 1% en peso de partículas sub-micrométricas de minerales naturales de fósforo a las pastas de cemento mezcladas con agua potable de la red para conseguir un mejor desempeño mecánico.

Ahora, en esta etapa del proyecto de investigación, es decir en esta tesis de maestría, se presentan los resultados del efecto que tiene la adición de partículas sub-micrométricas de minerales de fósforo en el desempeño mecánico de pastas de cemento mezcladas con agregados pétreos finos y agua potable de la red (Morteros). En este caso, se siguieron los protocolos experimentales desarrollados previamente en el Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales del Instituto de Física de la UNAM.

Objetivos

Objetivo General.- Evaluar el efecto de aditivos naturales elaborados a partir de minerales, en el desempeño mecánico de los morteros de cemento.

Objetivo Particular 1.- Estudiar la relación agua–cemento de los morteros para encontrar la relación más adecuada en el material y este pueda ser manipulado y aplicado.

Objetivo Particular 2.- Verificar si los aditivos empleados en esta investigación contribuyen a la disminución de la porosidad en los Morteros.

Objetivo Particular 3.- Determinar la evolución micro estructural del material en el periodo de endurecimiento de los Morteros.

Hipótesis

La incorporación de partículas sub-micrométricas de minerales de fósforo naturales en mezclas de Morteros, incrementan su resistencia a la compresión.



La Construcción Sustentable, se define como aquella que tiene especial respeto y compromiso con el ambiente; implica el uso eficiente de la energía, del agua, los recursos y los materiales no perjudiciales para el medio, resulta más saludable y se dirige hacia una reducción de los impactos ambientales.





“

*One cannot design with and work with a material wick one does not
Know and understand thoroughly. Therebefore, design quality starts
with education.”*

Jorg Schlaich, 1987.



C A P Í T U L O

2

MARCO
CONCEPTUAL

Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico.

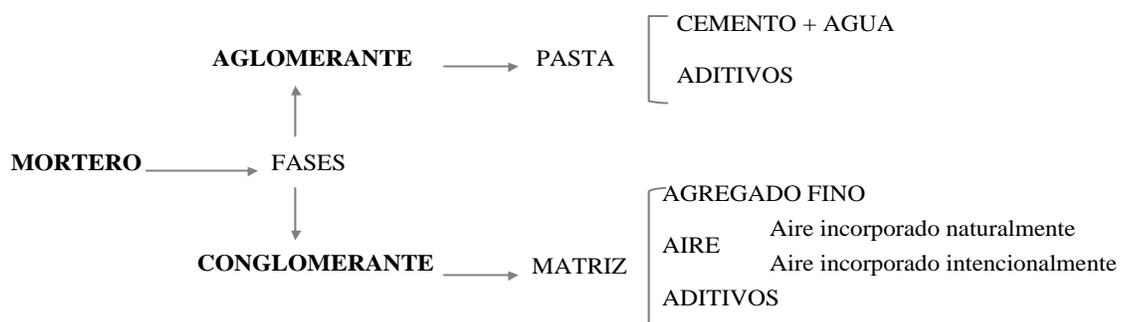


Capítulo 2. Marco conceptual

2.1 Definición de Mortero

La palabra “Mortero”, viene del latín mortarium que significa “sartén”, es decir, lugar dónde se preparaba por percusión el antiguo Mortero romano.³⁰

El Mortero es una mezcla plástica constituida por el ligante o conglomerante (cemento o cal) el cual formara la matriz cementante, agregados finos o aglomerados (arenas) constituyendo el relleno del material conglomerado, agua que actúa como medio desencadenante necesario de las reacciones de fraguado y eventualmente aditivos químicos o naturales que le otorgan características especiales.



▲ **Figura No. 4.-** Componentes de las fases principales de los Morteros hidráulicos a base de Cemento Portland.

El Mortero es un material que puede satisfacer varios requerimientos en el ámbito de la construcción, ya sea para el pegado de juntas de mampostería, aplanados, pisos, banquetas, plantillas, y actualmente también se utiliza como material estructural.

³⁰ Instituto Mexicano del Cemento y concreto, (2015). Fuente electronica de informacion, Disponible en: <http://www.imcyc.com/ct2008/feb08/puntodefuga.htm>, (Consultado el 12/07/2015).

Debido a todas estas funciones existen diferentes dosificaciones según los requerimientos y funciones que este material demande, y que solo una comprensión adecuada del comportamiento de los materiales constituyentes que intervienen en la mezcla tanto juntos como separados permitirá el diseño de un Mortero que cumpla con los requerimientos para realizar una tarea específica.

El Mortero no es considerado un material estructural como lo es el concreto, debido a las resistencias a compresión que este ofrece y a su principal función la cual es ser un enlace entre elementos de mampostería y que en conjunto actúa como un elemento integral obteniendo las características deseadas de rendimiento funcional.

Sin embargo debido a que la principal matriz del Mortero y concreto esta hecha a base de cemento, es común caer en el error que las características, procesos y procedimientos para fabricar concretos pueden ser utilizadas al generar mezclas de Morteros³¹.

Las propiedades de las mezclas de Mortero se dividen en dos fases; mezcla en estado fresco o plástico y mezcla en estado endurecido, aunque actualmente algunas propiedades del Mortero todavía no están definidas o reglamentadas por alguna normatividad. Dentro de la primera fase, las propiedades más relevantes en la consideración del diseño de mezclas de Mortero son la trabajabilidad, que a su vez depende de la fluidez y consistencia, la densidad de la masa unitaria de la mezcla, la adherencia en estado fresco, el tiempo de consistencia y fluidez, la retención de agua y el contenido de aire. Por su parte las principales características de los Morteros en estado endurecido son las propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión, la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión, siendo esta la más importante de todas en cuanto a requerimientos ingenieriles.

Las propiedades del Mortero en estado plástico o endurecido pueden ser modificados al adicionarles aditivos, los cuales son calculados previamente en la dosificación o el diseño de mezclas, estos aditivos permiten funciones como;

Ajustar el tiempo de fraguado o endurecimiento.

Reducir la demanda de agua.

Aumentar la consistencia y fluidez.

³¹ ASTM C 270-07, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. (2007). pp: 1-13.



2.2 Estructura del Mortero.

Los estudios sobre Morteros generan dificultades notables debido a su heterogeneidad, complejidad y naturaleza, siendo un factor de importancia su estructura, que según García (2004) esta constituida por el tipo, cantidad, tamaño, forma y distribución de sus fases; la pasta de cemento o fase conglomerante, la zona o fase de transición y los agregados finos o fase aglomerante³².

2.2.1 Fase - pasta de cemento.

Elementos ligantes o conglomerantes

Los materiales ligantes o conglomerantes, son aquellos que, por efecto químico, unen y dan cohesión a los áridos en los Morteros, siendo el cemento y la cal los más comunes en este tipo de mezclas.

Definición de Cemento

La palabra cemento se deriva del latín caementum, los romanos le llamaban opus caementitium (obra cementico) y procede, a su vez, del verbo caedere (precipitar)³³.

Se definen como materiales cementantes aquellos conglomerantes hidraulicos que, al adicionarles agua forman pastas que fraguan y endurecen mediante reacciones químicas de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables al aire como bajo el agua³⁴.

El cemento es el producto industrial más utilizado en el mundo, su relativamente bajo precio, versatilidad y altas prestaciones permiten un amplio campo de aplicaciones.³⁵

32 Judith, G.P. (2004). *Diseño de hormigones dirigido a la aplicación*. Tesina. España, Universidad Politécnica de Cataluña.

33 Luna, I.M.R. Diana, et al. (2010). *Estudio y Aplicación Normativa en la Fabricación del Cemento*, Tesis de licenciatura. Mexico, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas.

34 Norma Oficial Mexicana, NMX-C-021-ONNCCE-2004, (2004), Industria de la construcción-cemento para albañilería-(mortero)-especificaciones y métodos de ensayo.

35 Singer, S.S. (2005). *Enciclopedia de la Química Industrial*, Tomo 9 Cerámica Industrial. 9º edición, México: URMO.

Proceso de fabricación del cemento.

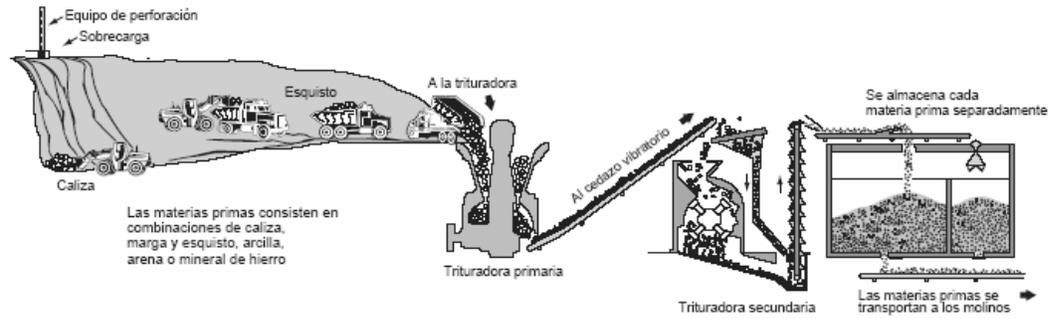
El proceso de elaboración del cemento requiere de muchos conocimientos de diferentes ciencias como la química, física, termodinámica, geología entre otras para su comprensión, además de estar actualizado en los avances científicos y tecnológicos generados en los procesos y equipos para la fabricación de este material.

Sin embargo, el proceso de fabricación se puede resumir en cuatro etapas importantes (Figura 5) la selección y extracción de materia prima, la molienda de materia prima en tamaños adecuados, el proceso de clinkerización y finalmente la molienda del Clinker y la adición de materiales como el yeso para su posterior almacenaje.

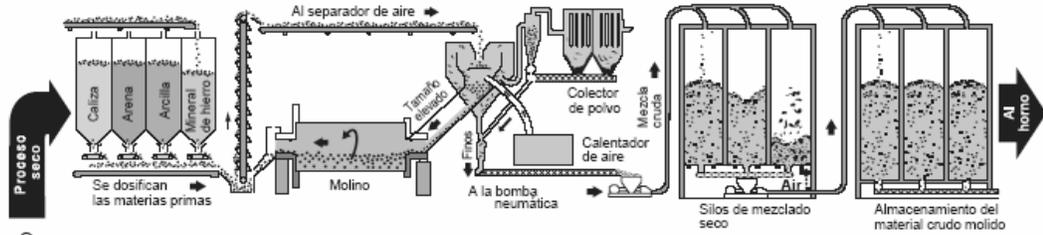
En la primera etapa la materia prima, principalmente rocas calizas y arcillas son estudiadas mediante diferentes procesos dependiendo de la dureza y ubicación del extracto de roca, seguida por reducciones de tamaño de las rocas para que puedan ser procesadas en los molinos, estas reducciones son por medio de volcaduras o explosiones a cielo abierto, el material es transportado en camiones hacia la fábrica donde se genera una primera molienda obteniendo un tamaño de roca menor y casi uniforme, siguiendo un proceso de tamizado donde se genera el diámetro de roca adecuado para que pueda ser calcinado.

El clinker, es obtenido cuando la materia prima es finamente molida, mezclándola y calentándola a temperaturas que oscilan entre los 1400 y 1700° Centígrados, cuando el material parcialmente fundido es obtenido (clinker) en partículas de forma redondeada de tamaños casi iguales a los de pelotas de golf, se enfría para ser triturado finamente agregándole una pequeña porción de (del orden de 2 a 5 % en peso) de sulfato de calcio (yeso) el cual ayuda a que el proceso de fraguado sea más lento.

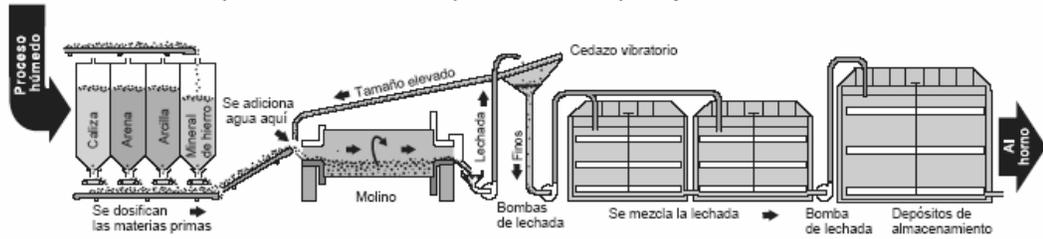




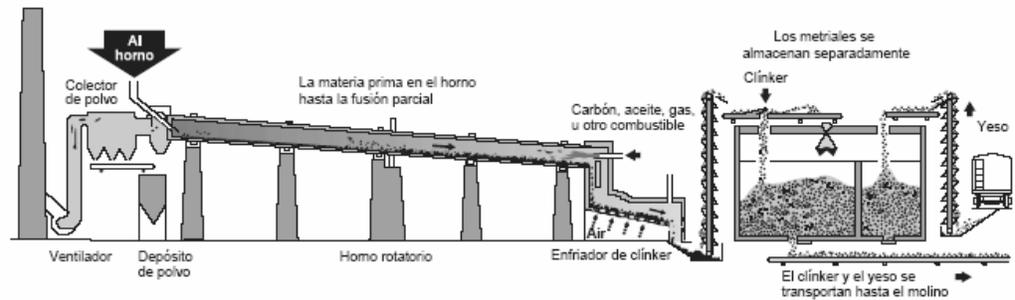
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces almacenarla.



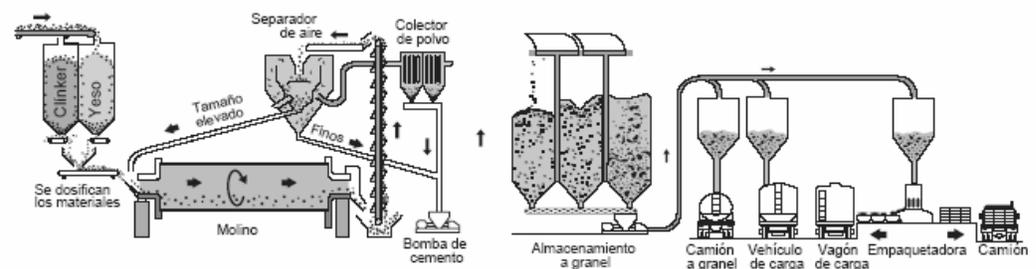
2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



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.

▲ **Figura No. 5.-** Etapas de la producción tradicional del cemento Portland. Extraído con fines didácticos de Kosmatka, S. H. et al. (2004) *Diseño y Control de Mezclas de concreto*, 1ra Edición. Illinois: Portland Cement Association.³⁶

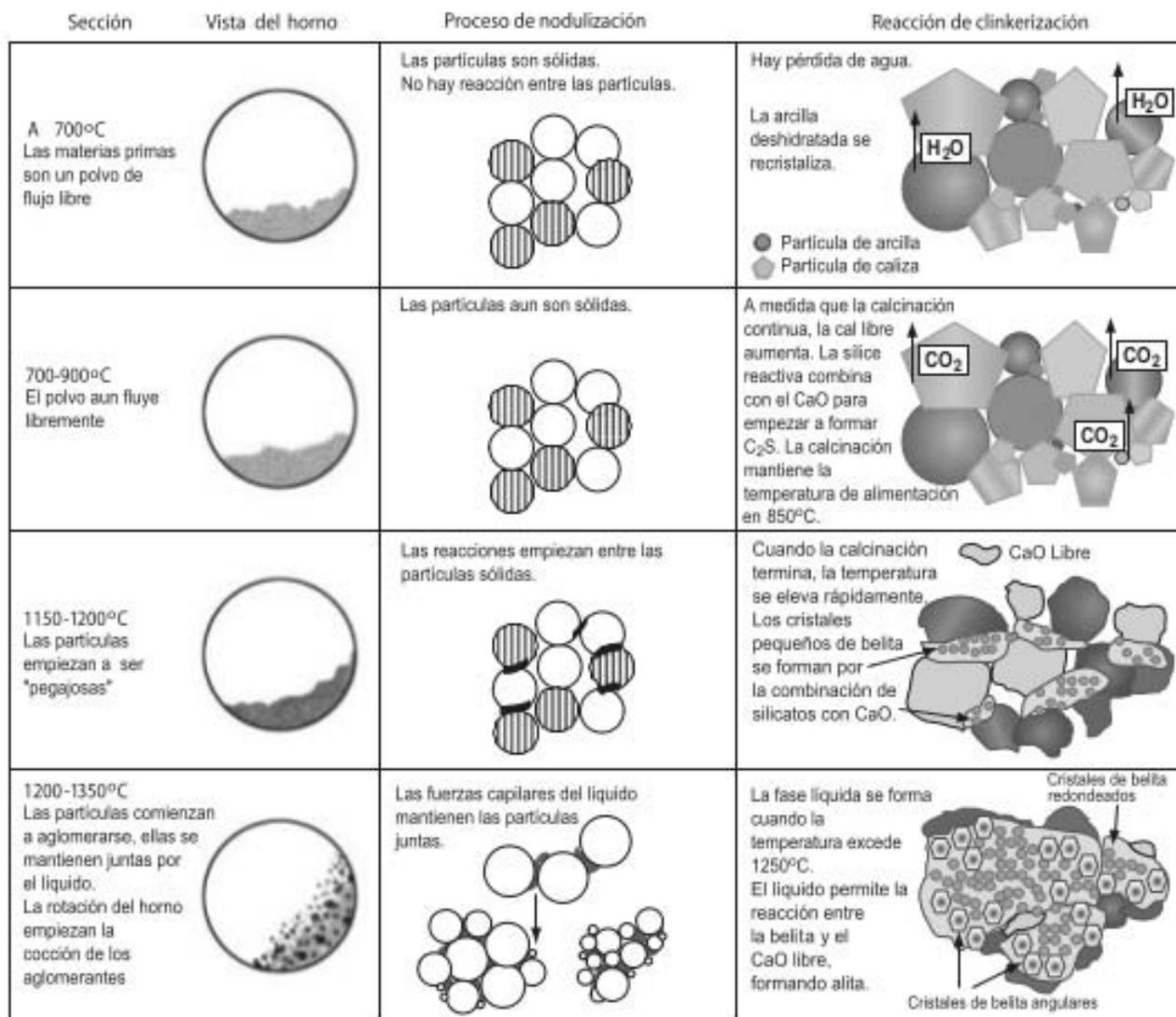
³⁶ Kosmatka, S. H. et al. (2004) *Diseño y Control de Mezclas de concreto*, 1ra Edición. Illinois: Portland

Composición química del cemento.

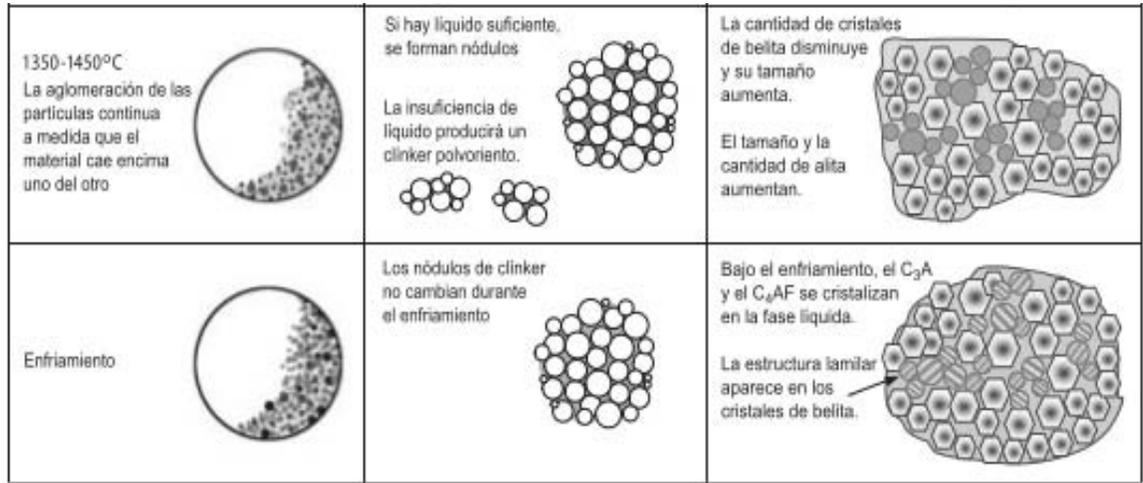
Los cementos están compuestos de diferentes materiales que adecuadamente dosificados mediante un proceso de producción controlado, dan al cemento las cualidades físicas, químicas y resistencias adecuadas al uso deseado.

Los componentes utilizados en las mezclas de un cemento consisten principalmente de limos, sílice, alúmina y óxido de hierro, interactuando entre ellos para formar productos más complejos.

La Figura No.6 muestra el proceso de producción del clínker desde la alimentación de la materia prima hasta el producto final.

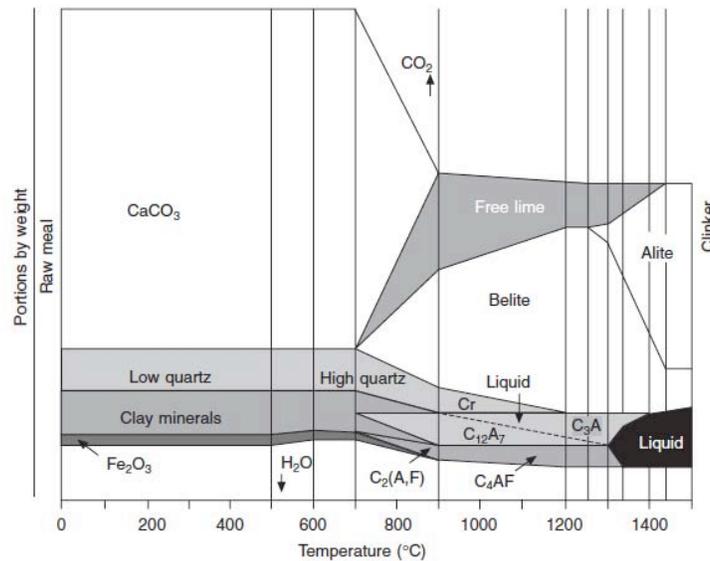


▲ **Figura No. 6.-** Proceso de producción del Clínker de la materia prima al producto final.



▲ **Figura No. 6 (Continuación).**- Proceso de producción del Clinker de la materia prima al producto final. Extraído con fines didácticos de Kosmatka, S. H. et al. (2004) *Diseño y Control de Mezclas de concreto*, 1ra Edición. Illinois: Portland Cement Association³⁷.

La composición típica del Clinker es principalmente generada por cuatro componentes considerados como los mayores constituyentes del Cemento CaO, SiO₂, Al₂O₃, y Fe₂O₃, este proceso normalmente tiene cuatro fases llamadas alita, belita, fase de aluminato y fase de ferrita. Otras fases como alkali sulfatos y oxido de calcio normalmente están presentes pero en menores cantidades³⁸.



▲ **Figura No. 7.-** Proceso de producción del Clinker de la materia prima al producto final. Secuencia de reacciones durante la formación del Cemento Portland. Extraído con fines didácticos de Newman, J y Choo, B.S. (2003) *Advanced Concrete Technology, Constituent Materials*³⁹.

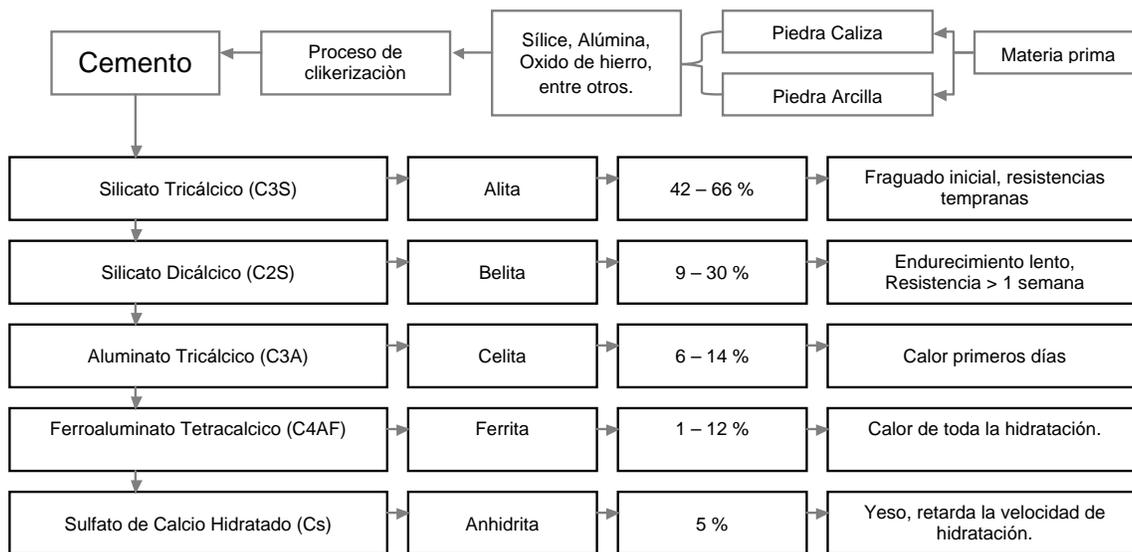
37 Kosmatka, S. H. et al. (2004) *Diseño y Control de Mezclas de concreto*, 1ra Edición. Illinois: Portland Cement Association.

38 Taylor, H.F.W. (1990) *Cement Chemistry*, 2da Edición. Reino Unido: ThomasTelford.

39 Newman, J y Choo, B.S. (2003) *Advanced Concrete Technology, Constituent Materials*, 2da Edición. Oxford:

Las reacciones que tienen efecto durante el proceso de clinkerización requieren grandes cantidades de energía (Ver Figura 7), siendo la descarbonatación la que más energía consume llevándose a cabo en rangos de temperatura oscilantes entre 700 y 1000°C, cuando la descarbonatación tiene su fase completa alrededor de los 1100°C, la temperatura se eleva más rápido, la cal reacciona con el sílice para formar la belita (C_2S) pero los niveles de cal sin reaccionar se mantiene altos hasta que se alcanza una temperatura de aproximadamente 1250°C, siendo esta temperatura el límite inferior de estabilidad termodinámica de la alita (C_3S), a 1300°C aproximadamente la fusión parcial ocurre, la fase líquida es proporcionada por la alúmina y óxido de hierro presente, el nivel de cal sin reaccionar se reduce a medida que el C_2S (silicato dicálcico) se convierte en C_3S (silicato tricálcico).

Normalmente, la formación de C_3S es efectivamente completa a una temperatura de aproximadamente 1450°C.



▲ **Figura No. 8.-** Principales compuestos químicos del cemento Portland.

Existen otros componentes como MgO , TiO_2 , K_2O y Na_2O en menores cantidades presentes en el cemento que no son muy significativos en los porcentajes .



Tamaño de partícula del cemento.

El tamaño de partícula en cementos tiene efectos ambivalentes en el Mortero, ya que a partículas pequeñas las reacciones de hidratación son más rápidas y por ende el endurecimiento se da a edades más tempranas, su disposición en sus partículas es mayor manteniéndose en suspensión cuando las mezclas son recién elaboradas, esto es benéfico para la cohesión, manejabilidad y capacidad de retención de agua en las mezclas de Mortero, por el otro lado entre más grandes son las partículas de cemento esta necesitarán de más agua para su hidratación, creando velocidades de generación de calor más grandes y provocando cambios volumétricos en el Mortero, así como agrietamientos⁴⁰.

De acuerdo a la Norma Mexicana NMX-C-021-ONNCCE-2004, sobre industria de la construcción-cemento para albañilería-especificaciones y métodos de prueba, la finura del cemento esta definida como la medida o tamaño de las partículas que componen el cemento; expresada en cm^2/gr lo cual llamamos superficie de contacto o superficie específica siendo su característica física principal, ya que como las reacciones de hidratación se producen en la superficie de los granos, sucede que cuanto más pequeño son éstos, más rápido es el desarrollo de la resistencia. La finura de la molienda influye también en el calor de hidratación, que se desarrolla más rápidamente en los cementos más finos. A mayor finura confiere mayor consistencia y fluidez al concreto con igual dosis de agua; en esas condiciones los cementos más finos tienen el inconveniente de una mayor retracción, pero ésta queda compensada en la práctica, pues a igual consistencia y fluidez exigen menos agua, y ésta influye en la retracción.

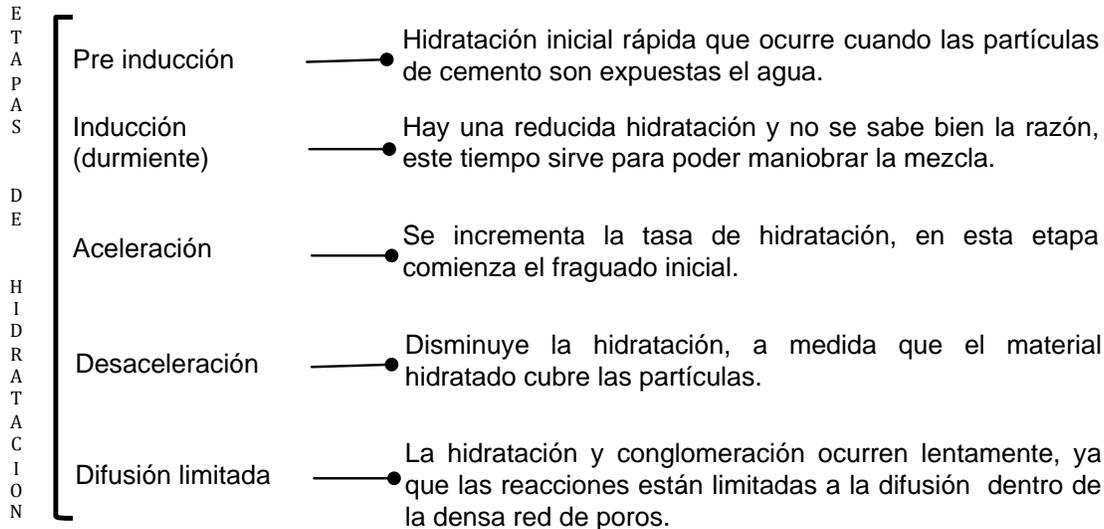
Reacción de hidratación del cemento Portland

El endurecimiento del cemento es el resultado de procesos químicos y físicos entre el cemento Portland y el agua, que se denomina hidratación. Las reacciones químicas que describen la hidratación del cemento son muy complejas. Para poder entender los procesos químicos que determinan el fraguado del cemento, es necesario estudiar la hidratación de

⁴⁰ Avraham, A.S.E.B. (2011) Evaluación de alcanolaminas útiles como ayuda de molienda para Clinker y que mejoren la resistencia a la compresión del mortero estándar del cemento, Tesis de licenciatura. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química.

cada uno de los minerales de Clinker por separado (C_3S Silicato Tricàlcico, C_2S Silicato Dicàlcico, C_3A Aluminato Dicàlcico y C_4AF Ferrita Aluminato Tricàlcico).

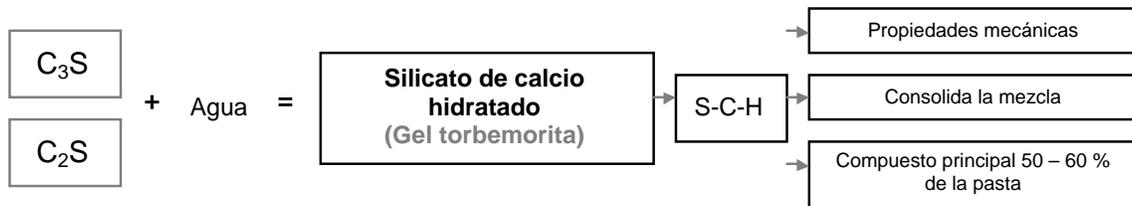
La hidratación de la pasta de cemento consta principalmente de 5 fases siendo de manera resumida en la tabla Figura 9.



▲ **Figura No. 9.-** Fases de hidratación de la pasta de cemento.

Sin embargo, de acuerdo a Kurdowsky (2014)⁴¹ al final del proceso de hidratación del cemento, las fases sólidas principales son:

Silicato de cálcico hidratado: la fase del silicato de cálcico hidratado, abreviada C-S-H, supone del 50 al 60% del volumen de sólidos en una pasta de cemento Portland completamente hidratada y es, por lo tanto, la más importante a la hora de determinar las propiedades de la pasta.



▲ **Figura No. 10.-** Hidratación de la fase de Silicato de Calcio Hidratado.

Hidróxido de cálcico: los cristales de hidróxido de cálcico (también llamados Portlandita) constituyen del 20 al 25% del volumen de sólidos en la pasta hidratada. En

41 Kurdowsky, W. (2014) *Cement and Concrete Chemistry*. 1ra. Edición, New York: Springer.

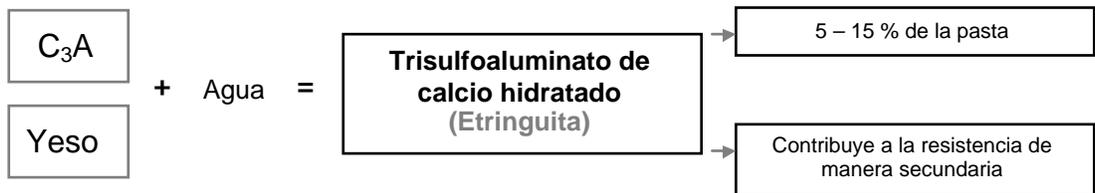


comparación con el C-S-H, la capacidad de contribución a la resistencia del hidróxido cálcico debido a las fuerzas de van der Waals queda limitada, como resultado de una zona superficial considerablemente menor.



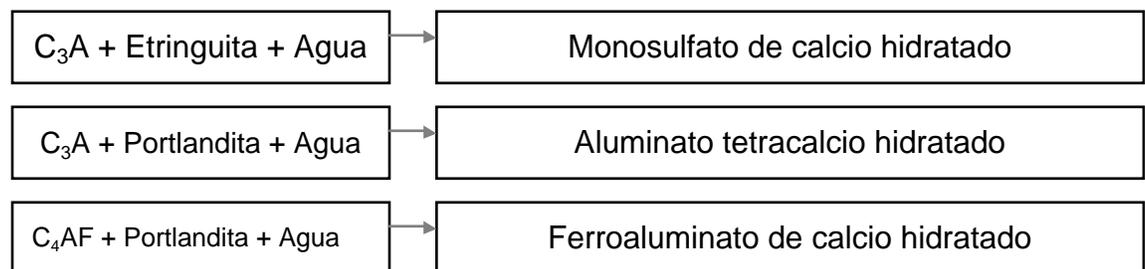
▲ **Figura No. 11.-** Hidratación de la fase de Hidróxido de Calcio.

Sulfoaluminatos cálcicos: estos compuestos ocupan del 15 al 20% del volumen de sólidos en la pasta de cemento hidratada y por lo tanto juegan sólo un pequeño papel en la relación entre estructura y propiedades resultantes.



▲ **Figura No. 12.-** Hidratación de la fase de Sulfatos cálcicos.

Existen otras fases que por el porcentaje en la pasta y por las acciones que estas generan son de un aspecto secundario.



▲ **Figura No. 13.-** Hidratación de componentes minoritarios en la pasta de cemento.

Granos de clinker no hidratados: en función de la distribución de tamaño de las partículas del cemento (en general, abarca tamaños de 1 a 50 μm) y del grado de hidratación podemos encontrar algunas partículas de clinker no hidratadas en la microestructura de la pasta de cemento hidratada, incluso mucho tiempo después de la hidratación.

Agua en la reacción de hidratación del cemento

El agua es un elemento primordial en las mezclas de concreto y Morteros, pues permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante.

Para cada cuantía de cemento existe una cantidad de agua del total de la agregada que se requiere para la hidratación del cemento; el resto del agua solo sirve para aumentar la fluidez de la pasta para que cumpla la función de lubricante de los agregados y se pueda obtener la manejabilidad adecuada de las mezclas frescas. El agua adicional es una masa que queda dentro de la mezcla y cuando fragua el concreto crea porosidad, lo que reduce la resistencia.

El agua utilizada en la elaboración del concreto y Mortero debe ser apta para el consumo humano, libre de sustancias como aceites, ácidos, sustancias alcalinas y materias orgánicas.

La norma oficial mexicana NMX – C – 122 – 1982, establece las cantidades de impurezas máximas que son tolerables en el agua de mezclado en la elaboración de mezclas de concretos y Morteros, sin embargo existen otras dos normas (NMX-C-227-1979 y NMX-C-283-1982) las cuales establecen límites y propiedades en las características de este componente.

El agua de mezclado esta definida como el volumen necesario para que la pasta de cemento sea eficientemente hidratada y se obtenga una fluidez tal que permita una lubricación adecuada de la pasta plástica, dividiéndose de acuerdo a la función que genera en⁴²;

Agua de hidratación: Es aquel volumen del agua de mezclado que sirve para generar las reacciones químicamente en el cemento, y generar la fase solidad del gel.

Agua de evaporación: La cantidad de agua que sobra en el agua de mezclado la cual no es necesaria para la hidratación es agua que puede evaporarse, sin embargo no toda es libre ya que el gel ejerce una atracción molecular debido al desarrollo superficial interno.

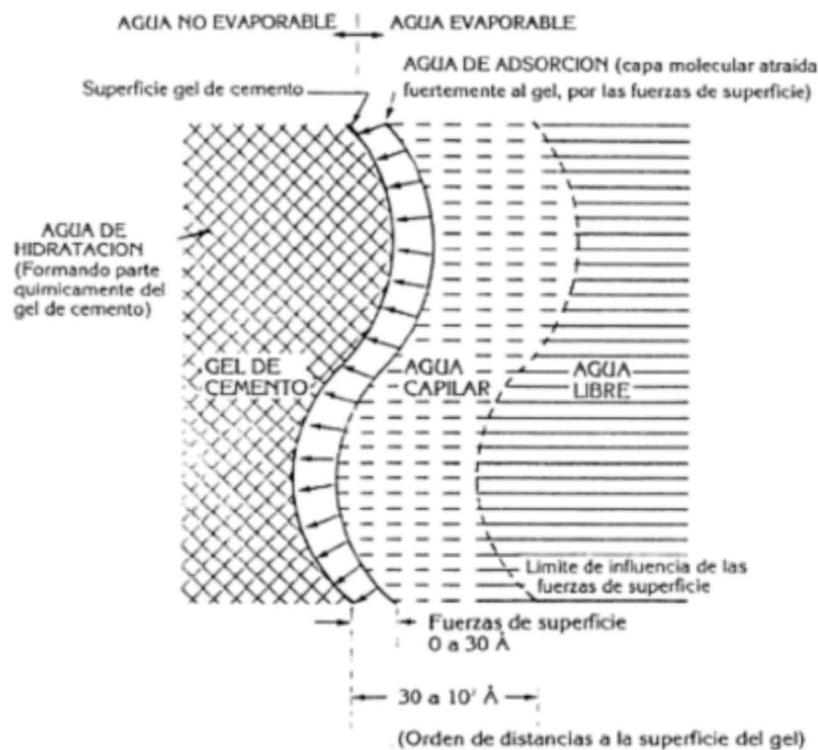
⁴² Guzmán, D.A.S. (2001)*Tecnología del concreto y del mortero*. 1ra Edición. Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.

Agua de adsorción: El agua de adsorción es aquella que se halla fuertemente adherida a las superficies del gel por fuerzas intermoleculares de atracción.

Agua capilar: El agua capilar es aquella que ocupa los poros capilares de las pastas a distancias que suelen estar comprendidas en el intervalo de 30 a 10^7 Angstroms, de manera que parte de ella esta sujeta a la influencia de las fuerzas de superficie del gel.

Agua libre: El agua libre es aquella que se encuentra fuera de las fuerzas de superficie generadas por el gel, de modo que tiene completa libertad de moverse o de evaporarse.

Agua de curado: El agua necesaria para un buen curado es aquella que favorecerá las condiciones necesarias para que la pasta de cemento evoluciones sin interrupciones hasta que la pasta deje de hidratarse y esta pueda alcanzar sus propiedades potenciales.



▲ **Figura No. 14.-** Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento. Extraído con fines didácticos de Guzmán, D.A.S. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. 1ra Edición. Colombia: Pontificia Universidad Javeriana. .

En resumen al mezclar el agua con el cemento se generan reacciones químicas y físicas donde se genera una pasta con fluidez en mayor o menor medida dependiendo de la cantidad de agua de mezclado. Al ir endureciendo la pasta, parte de esta agua de

mezclado queda fija a la estructura molecular (agua de hidratación) por las reacciones químicas y la demás cantidad de agua queda en estado libre. Si la cantidad de agua de mezclado aumenta para un misma cantidad de cemento, la cantidad de agua que queda fija es la misma quedando más agua libre y ocasionando un aumento en la porosidad de la pasta, ya que el agua libre se evapora y deja huecos, lo que disminuye la resistencia a la compresión.

Aditivos

Los aditivos son productos que se adicionan en pequeña proporción al concreto durante el mezclado, en porcentajes entre 0.1% y 5% (según el producto o el efecto deseado) de la masa o peso del cemento, con el propósito de producir una modificación en algunas de sus propiedades originales o en el comportamiento del concreto en su estado fresco y/o en condiciones de trabajo en una forma susceptible de ser prevista y controlada⁴³.

Debido a que los componentes básicos del concreto o Mortero son el cemento, agregado y agua, cualquier otro ingrediente que se incluya en su elaboración puede ser considerado un aditivo.

El comité ACI-116R define a un aditivo como un material diferente al agua, agregados, cemento hidráulico y fibras de refuerzo que se emplea como un ingrediente del concreto o Mortero y se agrega a la mezcla inmediatamente antes, durante o después de su mezclado. En consecuencia, el termino abarca un campo extremadamente amplio de materiales y productos.

Según la ASTM C 125 aditivo es; el material, además del cemento, agua y áridos, que se añade al concreto o Mortero inmediatamente, antes o durante el mezclado. El objeto de añadir aditivos es el de modificar, acentuar o conferir alguna propiedad que por la naturaleza de la mezcla no posea, y añadirle nuevas propiedades ya sea temporal o permanente durante su estado fresco o endurecido. Se aplica en dosis pequeñas y su efecto es de índole físico, químico o físico-químico.

⁴³ Patricio, E. S. (2011). *Diferentes tipos de aditivos para el concreto; Monografía*, Tesis de licenciatura. México, Universidad Veracruzana.



Las expresiones antes dadas nos definen que un aditivo es un material que se puede considerar solo cuando se incorpora individualmente al concreto, es decir, que se puede ejercer control sobre su dosificación.

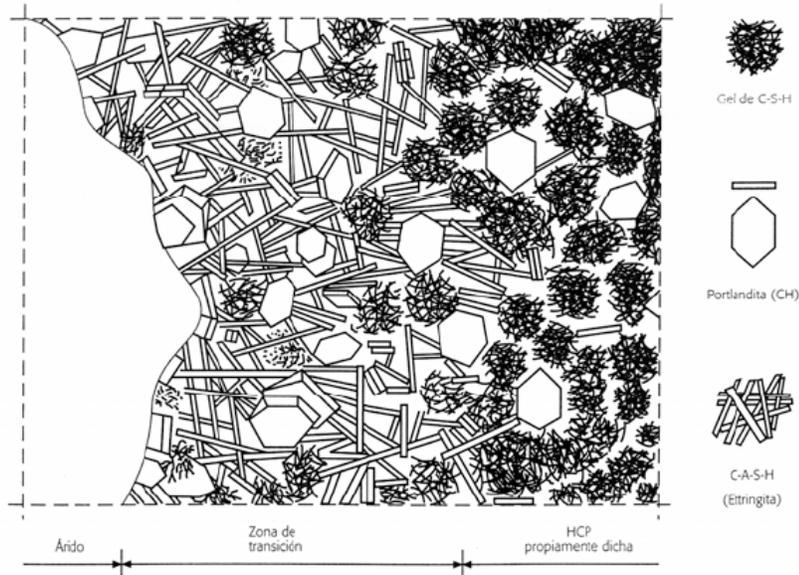
Las mezclas de concreto y Mortero deben ser trabajables, durables, impermeables y resistentes al desgaste. Estas cualidades se pueden obtener mediante el cálculo apropiado de la mezcla y la selección de materiales adecuados sin recurrir a aditivos, con excepción de los agentes incorporadores de aire cuando sean necesarios. Sin embargo, puede haber casos en que se requieran ciertas propiedades especiales, tales como: tiempo de fraguado prolongado, aceleración de la resistencia a corta edad, atrasar el desarrollo del calor de hidratación, entre otros factores que debido a tiempo-costo son fundamentales en las obras de construcción y arquitectura. En estos casos es aconsejable considerar e investigar ciertos aditivos, ya que su uso en el concreto puede producir los efectos especiales deseados.

Debido a esto los aditivos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Aditivos incorporadores de aire
- Aditivos plastificantes (reductores de agua)
- Aditivos retardadores
- Aditivos aceleradores
- Aditivos impermeabilizantes
- Aditivos expansivos

2.2.2 Fase – de transición.

La microestructura de la pasta de cemento endurecida que está muy próxima a la superficie de los áridos es distinta de la que presenta a una distancia algo mayor de la interfaz árido-pasta (Figura 15); constituye una zona interfacial de transición (ITZ por sus siglas en inglés) que no se puede obviar al modelizar la estructura del Mortero o concreto.



▲ **Figura No. 15.-**Microestructura de la pasta de cemento endurecida en la zona de transición.

Extraído con fines didácticos de Mehta, P.K. y Monteiro, P. J.M. (1986), *Concrete: MicroStructure, Properties and Materials*. 3ra. Edición. California: McGraw-Hill. ⁴⁴

El espesor de la ITZ depende de diversas variables, pero es, como máximo, de unos 50 μm y sus principales características son:

- Mayor porosidad.
- Mayor contenido y tamaño de los cristales de Portlandita y etringita (CH).

El volumen de pasta afectado por su proximidad a los agregados, es importante; así, las características y propiedades de la zona de transición tienen gran influencia en buena parte de las propiedades del concreto tecnológicamente importantes, como la resistencia, la rigidez y la durabilidad, sobre todo.

Existen dos causas, básicamente, que explican la génesis de la ITZ, ambas independientes de la exudación interna de agua⁴⁵.

En primer lugar, el efecto pared de los áridos, que provoca que la organización de las partículas de cemento sea menos densa cerca de los áridos. En efecto, cuando cualquier tipo de partículas sólidas se compacta dentro de un recipiente, su compacidad es menor cerca de las paredes del mismo, es decir, hay una zona paralela a las paredes

⁴⁴ Mehta, P.K. y Monteiro, P. J.M. (1986), *Concrete: MicroStructure, Properties and Materials*. 3ra. Edición. California: McGraw-Hill.

⁴⁵ Maso, J.C. (2005). *Interfacial Transition Zone in Concrete*, State-of-the-Art Report prepared by RILEM Technical Committee 108-ICC, Interfaces in Cementitious Composites. LMDC, Toulouse, France.



de mayor porosidad, cuyo espesor depende del tamaño de las partículas vertidas. Algo parecido ocurre en la ITZ, ya que, como el tamaño medio de las partículas de árido es unos dos órdenes mayor, al menos, que las partículas de cemento, se puede considerar que la superficie de los áridos es casi plana respecto a éstas.

En segundo lugar, el desarrollo asimétrico de la hidratación, que sólo se produce desde las partículas de cemento y, obviamente, no desde la superficie de los áridos. El hecho que la porosidad de la ITZ sea mayor equivale a admitir que, tras el vertido y la compactación del concreto, también es mayor en dicha zona la relación agua/cemento, lo cual justifica que sean menores las fracciones volumétricas de la fase anhidra y de gel de C-S-H en la ITZ y, en cambio, sea mayor la de CH. A esta heterogeneidad estructural hay que añadir la causada por la exudación interna de agua, que da lugar a huecos (por gravedad), especialmente debajo del árido grueso.

Si se admite que el espesor de la pasta de cemento situada entre partículas de árido adyacentes es de 80 a 150 μm , la ITZ ha de afectar al 30% de la pasta de cemento endurecida; por lo tanto, si se parte de un concreto con un 25% de pasta y un 75% de áridos (en volumen), la ITZ representa del orden del 8% del volumen total del concreto. Se trata, así, de una cuestión importante, pues se ha comprobado que la ITZ tiene menor resistencia, dado que hay menos cemento anhidro y menos gel de C-S-H, los dos componentes que confieren la mayor parte de esta característica; menor microdureza y menor módulo de deformación.

Las propiedades de la ITZ mejoran a medida que progresa la hidratación del cemento, en función de las propiedades mineralogía de los áridos y de las características de la pasta de concreto endurecida, en especial, la relación agua/cemento.

2.2.3 Fase – agregados o aglomerados.

Elementos aglomerantes

Los agregados pétreos (gravas y arenas) proceden de la desintegración de rocas y es el elemento que va disperso dentro de la pasta de cemento. Ambos materiales al

mezclarse con el agua, adquieren resistencias similares a la roca⁴⁶.

Los agregados finos son el constituyente más importante de las mezclas de Mortero en cuanto a volumen se refiere (50 a 70% del total), influyen en las propiedades del material tanto en estado fresco como endurecido, estos pueden variar grandemente en su composición debido a factores geológicos involucrados en su formación, deformación subsecuente y mineralogía de la fuente del mineral. Otras diferencias de composición en los agregados pueden deberse a los procesos utilizados en la trituración, en la clasificación por tamaño y en la limpieza. Las propiedades físicas de los agregados finos que afectan la mezcla son su granulometría, tamaño máximo, forma y textura de las partículas, masa volumétrica, absorción, masa unitaria específica y cantidad de arcilla en los finos.

Otro factor importante debido al tamaño de agregado en los Morteros es la relación agua – cemento, agregados con graduaciones uniformes y cantidades apropiadas de cada partícula generan mezclas con agregados de relleno y por ende menos cantidad de agua.

La actual norma ASTM C 33 limita la cantidad de material que pasa la malla numero 200 (0.075 mm, considerando a estos elementos como microfinos) a 7%, aunque una buena calidad en el concreto puede ser producida por altas cantidades de microfinos como veremos más adelante. Sin embargo muchos métodos de dosificación tales como el ACI 211 no consideran altas cantidades de microfinos, consideran parcialmente el efecto de la forma y la textura de los agregados, y no fomentan la optimización de agregado.

Agregado	Rango	Tamaño
Grueso	Retenido en No.4	4.76 mm
Fino	Pasa No. 4 - Retenido en No. 200	4.76-0.074 mm
Microfino	Pasa No. 200	menores a 0.074 mm

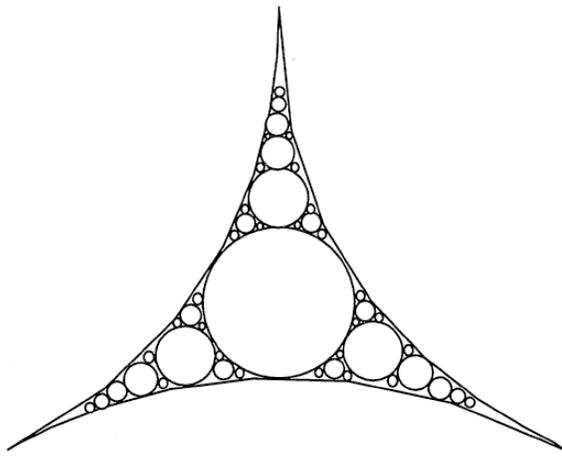
▲ **Tabla No.1.-** Clasificación de los agregados. Extraído con fines didácticos de Pedro Nel Quiroga and David W. Fowler, (2004).

46 Arellanes, S. R. (2007). Determinacion del modulo de elasticidad y la relacion de poisson del mortero cemento arena para la ciudad de Oaxaca y su area conurbada, Tesis de licenciatura. Mexico.



Efecto de la granulometría en los Morteros

El Mortero es una mezcla de áridos, cemento y agua, pasando por una transformación química lenta. Debido a que es un material compuesto, la clave del éxito es minimizar la influencia del material aglutinante más frágil, y maximizar la cantidad del material granular mucho más fuerte en medio de ella. La solución práctica se logra en arreglos hiper compactos, que constituyen una respuesta natural al problema planteado hace muchos siglos por Apolonio de Perga (alrededor de 262, alrededor de 190 aC)⁴⁷, el cual se ilustra en la Figura No. 16.



▲ **Figura No.16.-** Alrededor de 200 A.C, Apolonio de Perga inventó la disposición mostrada aquí para baldosas de una superficie lo más plenamente posible con círculos de diferentes tamaños. Este objeto goza de la propiedad de auto-similitud. Extraído con fines didácticos de B. B. Mandelbrot, B.B. (1977).

Esta idea es, probablemente, lo que inspiró a los ingenieros para añadir granulados de diferentes tamaños, que abarcan varios órdenes de magnitud, a las mezclas que se preparan para hacer concretos de alta resistencia.

Sin embargo las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los agregados en mezclas de Morteros y concretos afectan en diferentes formas a la mezcla tanto en estado fresco como en estado endurecido, a continuación se abarcaran algunos aspectos y teorías sobre la importancia de los agregados finos y micro finos en las mezclas de Mortero.

⁴⁷ B. B. Mandelbrot, B.B. (1977). *Fractals: form, chance, and dimensión*, San Francisco: Freeman and Company.

Efecto de la forma y textura de los agregados finos.

Hoy en día, la necesidad de caracterizar la forma de partículas del agregado para mezclas de concretos o Morteros ha tomado gran interés debido a la forma, la cual es un dato importante

para tener herramientas de predicción de las propiedades mecánicas y reológicas⁴⁸ en las mezclas.

La forma y textura de los agregados finos tiene una gran importancia en la consistencia y fluidez del concreto fresco, así como efecto sobre la resistencia y durabilidad en el concreto endurecido. De echo los efectos de los agregados finos son más importantes que los efectos que producen los agregados gruesos.

Partículas esféricas o cúbicas tienen menos superficie específica que las partículas planas y alargadas. En consecuencia, las partículas cúbicas o esféricas requieren menos agua para pegar y obtener una mayor consistencia y fluidez⁴⁹. Partículas escamosas y alargadas afectan negativamente la trabajabilidad de la mezcla, generando mezclas muy duras. Para un contenido de agua dado estas partículas en forma deficiente conducen a mezclas menos viables que las partículas cúbicas o esféricas. Para facilitar la aplicación de la mezcla, las partículas escamosas y alargadas aumentan la demanda de agua que afecta a la resistencia del concreto endurecido.

La fuerza y la permanencia de la unión entre el cemento y el agregado son funciones no sólo de la textura de la superficie, sino también de las características químicas de los áridos.

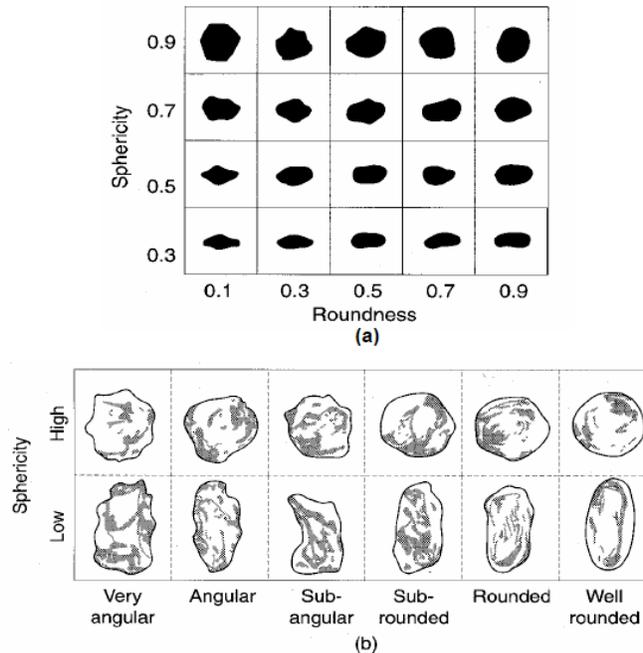
Barrett (1980)⁵⁰ sugirió que la forma de una partícula de roca se puede expresar en términos de la forma (forma general), redondez (suavidad en gran escala) y la textura de la superficie (suavidad en escala fina). Estos son geoméricamente independientes, aunque puede haber una correlación natural entre ellos, en el que un proceso que afecta a uno puede promover o inhibir el desarrollo de los demás. Aunque definiciones más antiguas

48 La reología (palabra introducida por Eugene Bingham en 1929) es la rama de la Física de medios continuos que se dedica al estudio de la deformación y el fluir de la materia. La reología describe la deformación de un cuerpo bajo la influencia de esfuerzos, se puede aplicar a todo tipo de material, sólido, líquido o gas.

49 Shilstone, J. M. (1999). *The Aggregate: The Most Important Value-Adding Component in Concrete, Proceedings*,7(1).

50 Barret, P.J. (1980). *The Shape of Rock Particles, a Critical Review*", *Sedimentology*. 27 (1), pp. 15-22.

son a menudo definiciones cualitativas, las definiciones más recientes son cuantitativas. Una de las definiciones antiguas sobre la forma de la partícula basada en observaciones morfológicas, se muestra en la figura siguiente.



▲ **Figura No.17.-** Evaluación visual de la forma de partículas; a) Derivado de mediciones de la esfericidad y redondez; (b) Sobre la base de Observaciones morfológicas. Extraído con fines didácticos de Powers, T.C., (1966) *The Nature of Concrete, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials*.⁵¹

De acuerdo con el Modelo Embalaje compresible de Larrard (1999)⁵², el efecto de la densidad de empaquetamiento incrementa la importancia para los tamaños más pequeños. La Angularidad afecta al contenido en huecos. De hecho, las partículas angulares tienden a aumentar la demanda de agua, ya que tienen un mayor contenido de vacío que las partículas redondas. La investigación realizada por Kaplan (1959)⁵³, indica que la resistencia a la compresión y flexión del concreto parece depender de la angularidad: partículas angulares tienden a aumentar puntos fuertes.

Por otra parte según Galloway (1994)⁵⁴, la textura de la superficie tiene un efecto significativo en la fuerza, ya que las superficies ásperas mejoran el pegado aumentando la

51 Powers, T.C., (1966) *The Nature of Concrete, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials*. ASTM STP 169A. American Society for Testing Materials.

52 De Larrard, F. (1999) *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, 1ra edición, London.

53 Kaplan, M. F., (1959) *Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregates*. *Proceedings*, American Concrete Institute, 55 (3), pp. 1193-1208.

54 Galloway, J. E. Jr., (1994). *Grading, Shape, and Surface Properties*, ASTM Special Technical Publication 169 (C), pp. 401-410.

fuerza de unión y la resistencia a la flexión.

Efecto de la forma y textura de los agregados micro-finos.

Pocos estudios se han realizado sobre el efecto de la forma y la textura de agregados finos o microfinos sobre el desempeño del concreto fresco y endurecido. Debido al pequeño tamaño de las partículas, se requiere el uso de herramientas especiales, tales como microscopios electrónicos, dispositivos de adsorción de nitrógeno, y analizadores de difracción láser. Al igual que con el agregado fino, partículas mal formadas o ásperas conducen a altos vacíos y aumentan la demanda de agua.

Hudson afirma que los agregados menores a 150 micras (malla N0. 100) podrían actuar en el concreto fresco como lubricante, siempre y cuando sean cúbicas o de buena forma.

Yuli Wang (2013)⁵⁵ en su estudio *Efecto físico de los agregados micro finos en concreto de cemento*, establece una formula para explicar cuantitativamente el efecto físico de relleno de micro agregados. El ejemplo diseñado por Wang mostró que las regularidades de variación de caída y resistencia a la compresión eran las mismas que la de la cantidad de agua libre en la mezcla de concreto fresco, llegando a la conclusión del papel importante que toman los microfinos en las mejoras del concreto.

Efecto de la mineralogía de los agregados finos.

Los agregados con diferente composición mineralógica producen concretos de diferentes características. De acuerdo con Alexander⁵⁶, el tipo de agregado afecta a la resistencia y la rigidez y a largo plazo las deformaciones del la mezcla en estado endurecido. Por ejemplo, algunos agregados pueden reaccionar negativamente con cemento o, por el contrario, pueden interactuar beneficiosamente con la pasta de cemento mejorando el pegado.

55 Yuli W, et al. (2013), *Physical filling effect of aggregate micro fines in cement concrete*, *Construction and Building Materials*. 41, pp: 812 - 814

56 Alexander, M.G. et al. (1996), "Aggregates and the Deformation Properties of Concrete," *ACI Materials Journal*, 93 (6), pp: 569.

Porosidad o vacíos en los agregados finos.

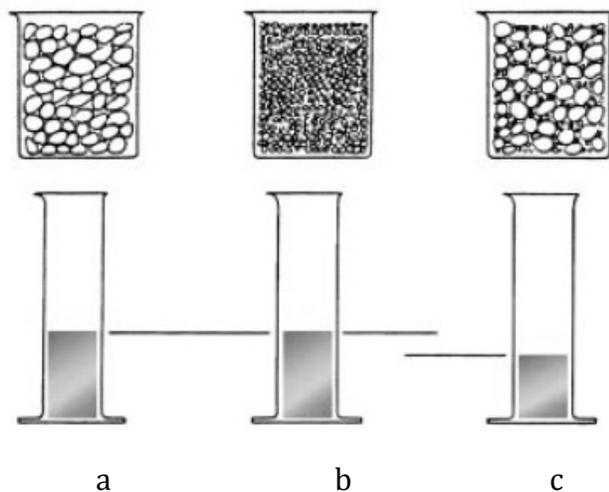
Resulta de gran interés adoptar la hipótesis de que el esqueleto granular óptimo para el concreto es aquel que presenta el mínimo contenido de vacíos cuando se mezclan y compactan en seco los áridos que lo constituyen. En este sentido, se trabaja con la densidad de empaquetamiento (“packing density”) de áridos de cara a encontrar el mínimo de huecos. Existen varias razones -además de las ya comentadas sobre resistencia y durabilidad- que justifican que el árido ocupe un volumen relativo lo más grande posible, como las de tipo económico, pues el árido es más barato que la pasta de cemento, y las de tipo técnico, ya que al ser más grande el volumen de áridos menor será el de pasta con la consiguiente influencia en una menor retracción y fluencia del concreto. Por otra parte, al ser los áridos, generalmente, más resistentes que la pasta, los concretos deberán ser tanto más resistentes cuanto mayor volumen relativo ocupen estos en la masa de hormigón. En general, esta mayor proporción de áridos en la masa se consigue empleando el mayor tamaño posible de árido y haciendo que los huecos existentes entre los granos gruesos sean ocupados por los de tamaño inmediato inferior, y los existentes entre estos lo sean por los siguientes en tamaño y así sucesivamente hasta que las partículas más finas de la arena terminen por rellenar los últimos huecos existentes. Sin embargo, entre aquéllas aún quedan huecos en los que ha de entrar la pasta para su relleno.

A medida que aumenta el tamaño máximo de árido utilizado, disminuye el porcentaje de huecos presentes en el esqueleto granular. Como se ha comentado, la presencia de un mayor contenido de partículas intermedias permite un relleno sucesivo de espacios, que conduce a un empaquetamiento más eficiente que el que se obtendría con el uso de un solo tamaño de granulados.

Según la Portland Cement Association (PCA)⁵⁷ el efecto de empaquetamiento al combinar varios tamaños de agregados pétreos sobre el volumen total de vacíos se muestra en la Figura 18. La probeta de la izquierda se llena con partículas grandes de agregados con tamaño y forma uniformes. La probeta del medio se llena con el mismo volumen

⁵⁷ Kosmatka, S. H. et al. (2004) *Diseño y Control de Mezclas de concreto*, 1ra Edición. Illinois: Portland Cement Association.

de partículas pequeñas de agregado con tamaño y forma uniformes y la probeta de la derecha se llena con partículas de ambos tamaños. Debajo de cada probeta con agregado se enseña una probeta graduada con la cantidad de agua necesaria para llenar los vacíos en la probeta con agregado. Nótese que cuando la probeta se llena con un solo tamaño de partículas, un mismo volumen de agregado contiene una cantidad de vacíos constante, independientemente del tamaño del agregado. Cuando se combinan dos tamaños de agregados, la cantidad de vacíos disminuye. Si se repitiera esta operación con la inclusión adicional de varios tamaños, ocurriría una reducción aún mayor en la cantidad de vacíos. La demanda de pasta de cemento para el concreto se relaciona con la cantidad de vacíos de la combinación de agregados.

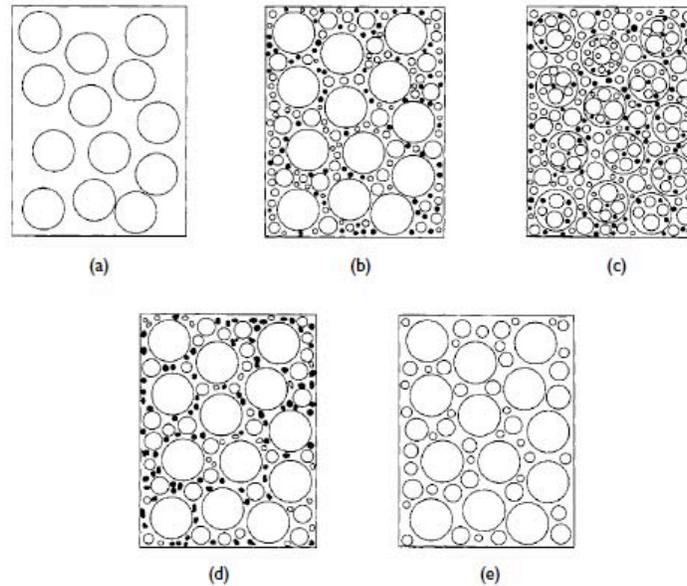


▲ **Figura No. 18.-** El nivel del líquido en las probetas, que representan a los vacíos, es constante para volúmenes absolutos iguales de agregados con tamaños uniformes, aunque diferentes (a, b). Cuando se combinan tamaños diferentes, el contenido de vacíos disminuye (c). La ilustración no está en escala. Extraído con fines didácticos de Kosmatka, S. H. et al. (2004) *Diseño y Control de Mezclas de concreto*.

La distribución de los agregados gobierna la cantidad de huecos que debe ser llenado por la pasta, así como el área de superficie de los agregados que necesita ser recubierta con pasta. Existen varios tipos de distribución o granulometría para hacer mezclas de concreto o Mortero, ilustradas en la Figura 19. Uniforme o agregados de un solo tamaño (Figura 19-a) contienen grandes volúmenes de huecos entre las partículas, mientras que la distribución continua (Figura 19-b) en el que está presente una gama de tamaños disminuye el espacio vacío y reduce los volúmenes de pasta de cemento. El uso de un total de tamaño máximo (Figura 19-c) también puede reducir el espacio



generado por los vacíos. De vez en cuando, la granulometría bien graduada (Figura 19-d) o agregados sin finos (Figura 19-e) se utilizan también.



▲ **Figura No.19.-** Representación esquemática de la distribución de agregados en un ensamble de partículas: (a) tamaño uniforme; (b) distribución continua; (c) reemplazo de tamaños grandes por tamaños largos; (d) diferentes graduaciones de agregado; (e) distribución sin finos (Mindess et al., 2003). Extraído con fines didácticos de Mindess, S., Young, J. F., and Darwin, D. (2003). Concrete. 2nd Ed., Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 58

La distribución de los agregados no es una “propiedad” como tal. Sin embargo, los efectos combinados de la forma de las partículas, textura de la superficie, y la clasificación gobiernan en gran medida las propiedades plásticas del concreto y ninguna de estas propiedades pueden ser considerados de forma aislada de los otros.

Durante los primeros años de la tecnología del concreto, se asumía, algunas veces, que el menor porcentaje de vacíos (mayor densidad del agregado) era más adecuado para el concreto. En la misma época, se crearon límites para las cantidades y tamaños de las partículas más pequeñas. Ahora se sabe que, incluso en estas bases restrictas, este no es el mejor enfoque para el diseñador de la mezcla. Sin embargo, la producción de un concreto satisfactorio y económico requiere agregados con baja cantidad de vacíos, pero no la más baja.

58 Mindess, S., Young, J. F., and Darwin, D. (2003). Concrete. 2nd Ed., Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.





“ Si una construcción se cae causando la muerte del dueño o su hijo, cualquiera sea el caso, el constructor o su hijo deben ser muertos. Si el esclavo del dueño de la casa muere, él deberá entregarte un esclavo del mismo valor. Si otras posesiones son destruidas, estas deberán ser restituidas, y las partes dañadas de la casa deberán ser reconstruidas a costo del constructor. ”

Hammurabi, un rey de Babilonia...

C A P Í T U L O

3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para aquellos comprometidos con la industria de la construcción, el código de Hammurabi debe ser un recordatorio de la responsabilidad de la seguridad en las estructuras de concreto.

Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico.





Capítulo 3. Procedimiento

Experimental

3.1 Metodo del trabajo de investigación

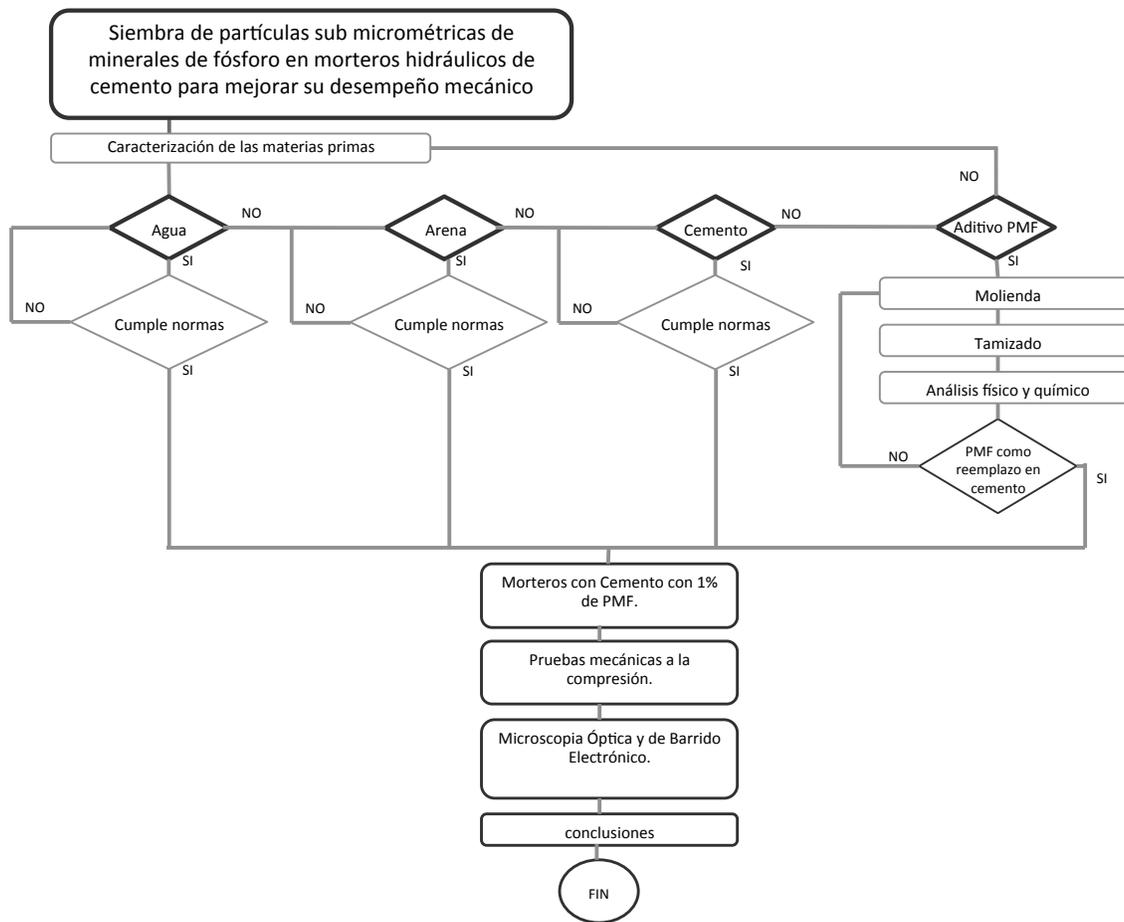
El procedimiento experimental principalmente se basa en obtener partículas sub micrométricas de minerales de fósforo -que denotaremos a partir de ahora como PMF- mediante un proceso de molienda mecánica de alta energía y su empleo como aditivo en mezclas de Morteros elaboradas con Cemento Portland. Este aditivo se agregó a las mezclas en una proporción del 1% en peso respecto al peso total de Cemento Portland utilizado en las mezclas de Mortero.

Además, se hace la caracterización física y química de las mezclas de Mortero elaboradas con el aditivo (PMF), y como influye este en el desempeño mecánico del Mortero, y finalmente se describe una aplicación directa el campo de la construcción.

La experimentación realizada en la presente investigación se hizo de acuerdo a normas nacionales e internacionales en los laboratorios del Instituto de Física de la UNAM que cuentan con la capacidad técnica, material y humana para efectuar las mediciones y análisis para determinar propiedades físico-químicas de los materiales en estudio, con garantía de calidad y confiabilidad.

El procedimiento experimental que seguimos se muestra en el diagrama de la Figura 20, el cual se inicia con la caracterización de los materiales que constituirán las

mezclas de Mortero elaboradas. Primeramente se estudiaron diferentes tipos de cementos comerciales, así como agregados finos disponibles en la zona, evaluando el efecto de estos elementos en los Morteros, después de obtener los parámetros del comportamiento de los estos materiales, se adicionaron las partículas sub micrométricas PMF de origen natural. Seguidamente se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión en diferentes periodos de tiempo -3, 7, 14 y 28 días de endurecimiento según lo establecido en la norma ASTM C-109-, finalmente en los Morteros realizados fueron analizadas las fases de hidratación mediante Microscopía Óptica y Electrónica de Barrido, para determinar la evolución macro y micro estructural del material.



▲ **Figura No. 20.-** Diagrama de flujo mostrando el Diseño de la fase experimental seguido en la investigación.

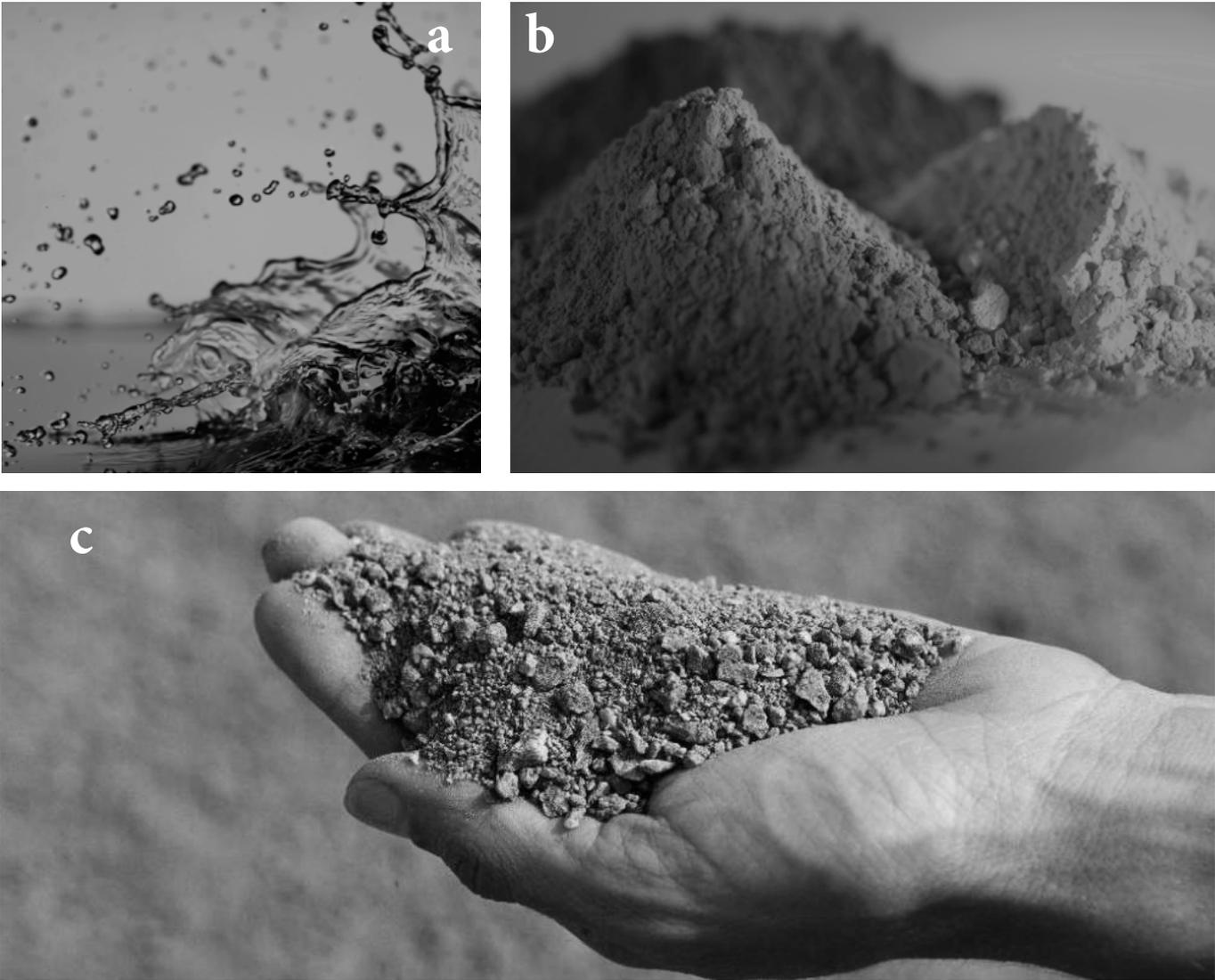
3.2 Materiales empleados

Cemento: La marca utilizada para esta experimentación fue Cemento Cruz Azul®, el cual es tipo Portland compuesto grado 30 R. Esta marca comercial es de gran uso y presencia en el centro de la república mexicana, lo cual hace que sea una de las marcas más utilizadas en la construcción.

El cemento Cruz Azul satisface ampliamente las especificaciones de la Norma Mexicana NMX C-414-ONNCCE y la norma norteamericana ASTM C-595. Este cemento pasa por un estricto control de calidad en la selección de sus materiales mediante la certificación ISO 9001:2008, es ideal para toda obra que requiera mayor resistencia al ataque de ambientes agresivos, suelos salitrosos, aguas negras y cercanía al mar, estructuras de concreto simple (pisos, banquetas y guarniciones), así como también para concreto armado (trabes, cadenas de desplante, columnas, losas y pavimentos) debido a su compatibilidad con todos los materiales de construcción convencionales (arenas y gravas de mina de río triturado, mármol, cantera, tezontle, etc.)⁵⁹.

Minerales de fósforo de origen natural (PMF): Para fabricar las partículas sub micrométricas de minerales de fósforo, se empleó un producto comercial identificado como Fosfato Tricalcico (TCP por sus siglas en inglés) de origen natural que se emplea comúnmente como complemento alimenticio para animales. El fosfato tricálcico es un fosfato de calcio formado por calcio, fósforo y oxígeno cuya fórmula química es $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Sin embargo, un análisis detallado por difracción de rayos X mostró que en realidad se tiene una mezcla de minerales cristalinos y amorfos de diferentes fosfatos de calcio, por este motivo en el resto de la tesis hablaremos de partículas de minerales de fósforo (PMF).

⁵⁹ Cooperativa Cruz Azul (2013) Tipos de cemento. Fuente electrónica de Información. Disponible en: <http://www.cruzazul.com.mx/2008/producto/tiposCemento.aspx>. (Consultado el 22/02/16).



▲ **Figura No. 21.-** Fotografías de los materiales utilizados para generar los morteros hidráulicos de cemento; a) Agua potable tomada de la red de distribución de los laboratorios de Física de la UNAM, b) Cemento Portland Ordinario Marca Cruz Azul y Fosfato Tricálcico sin molienda, c) “Arena rosa”.

Arena: La arena “rosa” utilizada en la experimentación fue obtenida en la zona oriente del estado de México, debido a su gran uso en la construcción y también por la amplia oferta de este tipo de agregado en toda la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Agua: El agua utilizada en las mezclas de Mortero en estudio fue obtenida de la red de agua potable del Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales del Instituto de Física ubicado en la Universidad Nacional Autónoma de México.

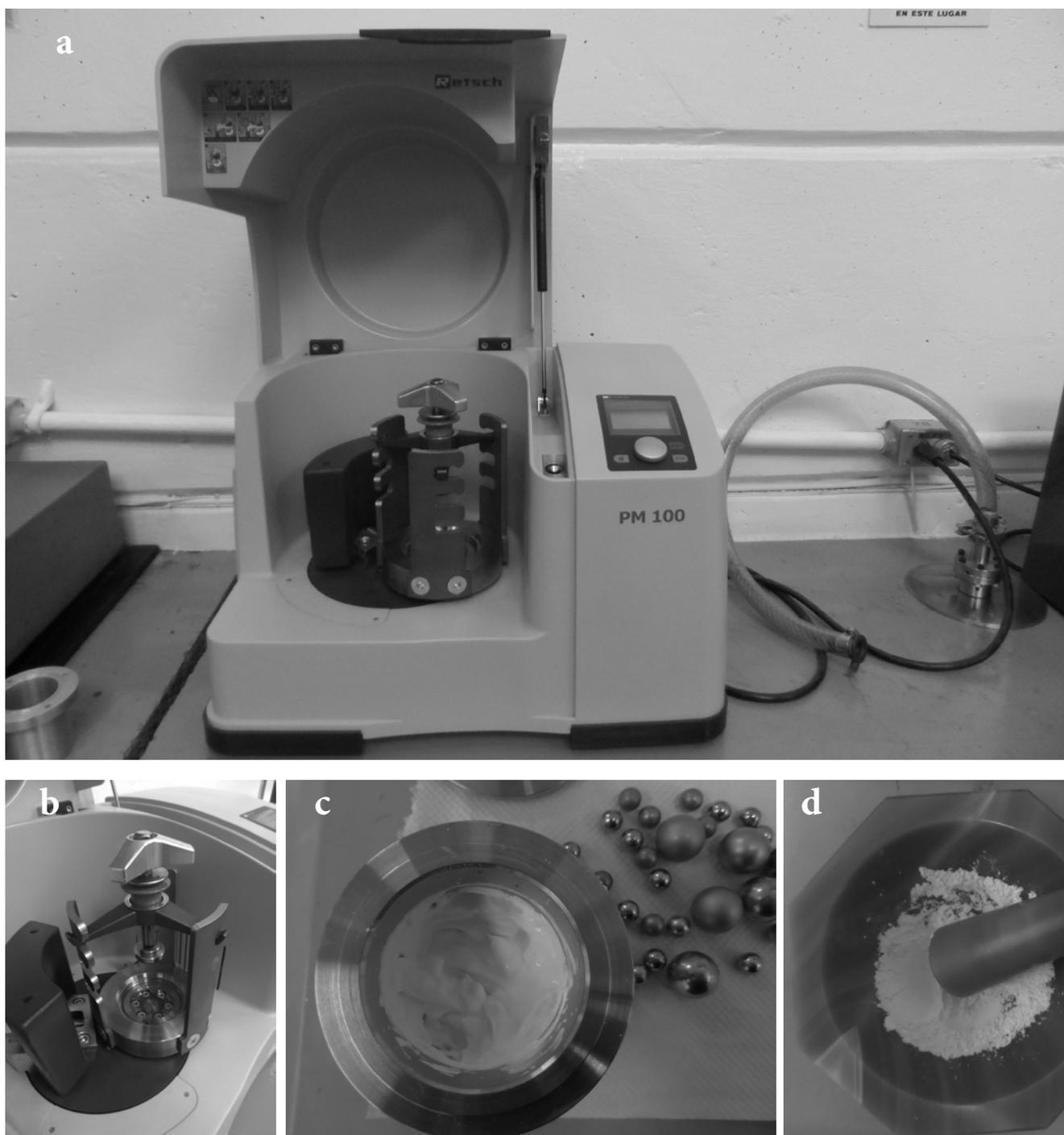


3.3 Obtención de las partículas sub micrométricas PMF.

La rutina para generar el tamaño de las partículas sub micrométricas de PMF aplicadas a las mezclas de Morteros, fue realizada por medio de molienda mecánica en un molino de bolas de tipo centrifugo Marca Retsch Modelo PM 100 con tarro y bolas de agata, cuya velocidades alcanzan 700 rpm y un máximo de tiempo de 2 horas en funcionamiento continuo. En este trabajo de investigación se pesaron 50 ml en volumen de minerales de fósforo de origen natural (PMF) para su posterior vaciado en el tarro y se utilizaron 6 bolas grandes de 2 centímetros de diámetro y 25 bolas chicas de 0.5 centímetros de diámetro a una velocidad de 600 rpm durante un periodo de 12 horas de molienda.

Con la disminución de tamaño de partícula se pretende que los procesos de disolución de los reactivos principales sean más rápidos y por tanto que puedan iniciarse los procesos químicos en un tiempo más corto, dando lugar a cementos de fraguado y endurecimiento más rápidos⁶⁰.

60 Chow, L.C. et al. (1991). Self-setting calcium phosphate cements. *Mat. Res. Soc. Symp.* 179, pp: 3-24.



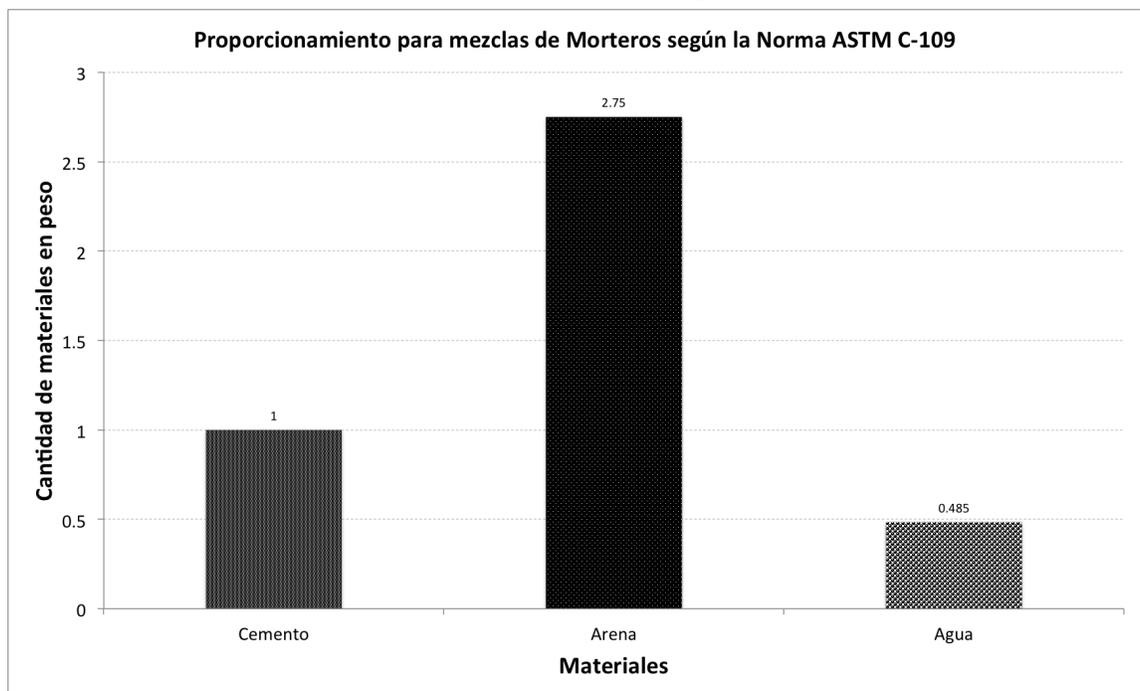
▲ **Figura No. 22.**-Fotografías de los equipos utilizados para realizar la molienda mecánica del fosfato tricálcico, a,b) Molino de bolas Marca Retsch Modelo PM 100, c) tarro y bolas de ágata, d) mortero de molienda.



3.4 Elaboración de las mezclas.

El diseño de mezclas fue realizado con base en la norma ASTM C-109 “Método de resistencia a la compresión de Morteros de cemento hidráulico, usando moldes para especímenes de 2 pulgadas”, sin embargo para la realización de la investigación también se tomo como referencia el estudio titulado The Chemistry and Physics of Nano-Cement⁶¹ modificando los moldes de cúbicos a cilíndricos y con menores dimensiones.

En la norma ASTM C-109 se establece que la proporción para un Mortero estándar debe ser una parte de cemento por 2.75 partes en peso de arena estándar graduada, usando una relación agua - cemento de 0.485 para todos los tipos de cemento Portland.



▲ **Figura No. 23.-** Proporcionamiento de Morteros de Cemento según la Norma ASTM C-109

El primer paso de la elaboración de las probetas fue pegar los moldes donde se vaciaría la mezcla, estos moldes fueron realizados de acrílico transparente (elemento que no hace reacción ante los elementos de la mezcla del Mortero) de 1.8 centímetros de

⁶¹ Loyola. H.M.A. (2006) The Chemistry and Physics of Nano-Cement, Marymount University.

**Figura
No. 24**

Elaboración de las Mezclas
Proceso de elaboración del tipo de mezclas realizadas en la investigación
Fotografía realizada en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.



diámetro por 2.5 centímetros de altura, recubiertos de vaselina para el fácil desmolde de las probetas después de endurecida la mezcla, el pegado de los molde se realizo con silicón sobre una base de vidrio.

Después de haber fijado los moldes de manera correcta, se procedió a calcular las cantidades de materiales necesarios, estas cantidades fueron obtenidas de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C – 109, como se muestra a continuación;

Calculo de las cantidades de materiales para los especímenes.

$$A = \pi \times r^2 = 3.1416 \times 0.9 = 2.54 \text{ cm}^2$$

$$V = A \times h = 2.54 \times 2.5 = 6.35 \text{ cm}^3$$

$$V = 7 \text{ cms}^3$$

Para 6 muestras cubicas de 5 cms de lado con un volumen total de 125 cm³, la norma ASTM C-109 establece que se necesitan 500 gramos de cemento, 1345 gramos de arena y 242 mililitros de agua. Solo se realizaron reglas de tres para el calculo del total de cada material para 7 cms³ que requiere el molde del el espécimen en estudio, obteniéndose la siguientes cantidades de material:

Cemento	500 grs = 750 mc ³
	X grs = 7 cm ³
	X = 4.67 grs

Arena	1375 grs = 750 cms ³
	X grs = 7 cms ³
	X = 12.83 grs

Agua	242 ml = 750 cms ³
	X ml = 7 cms ³
	X = 2.25 ml

Sin embargo debido a la granulometría y el peso seco de la arena así como la adición de las partículas sub micrométricas el volumen total de agua cambió para poder obtener un trabajabilidad adecuada. Por lo que para la mezcla de referencia se obtuvieron los siguientes volúmenes de materiales por cada cilindro de prueba:

Volumen de materiales para un cilindro 7cm ³		
Cemento	Agregados	Agua
Gramos	Gramos	Mililitros
4.67	12.38	3.970

Tabla 2.- Cantidades de mezcla utilizada en los Morteros de referencia.

Para las mezclas elaboradas con aditivo se obtuvieron las siguientes cantidades de material:

Volumen de materiales para un cilindro 7 cm ³			
Cemento	Agregados	Agua	PMF
Gramos	Gramos	Mililitros	Gramos
4.67	12.38	3.970	0.047

Tabla 3.- Cantidades de mezcla utilizada en los Morteros con adición de partículas sub micrométricas de materiales de fósforo natural.

Una vez pesados los materiales requeridos para las dos probetas, se vaciaron en un vaso de precipitados para homogenizar el cemento, arena y agua, mediante mezclado mecánico.



▲ **Figura No. 25.-** Mezclas de Mortero realizadas en la investigación.

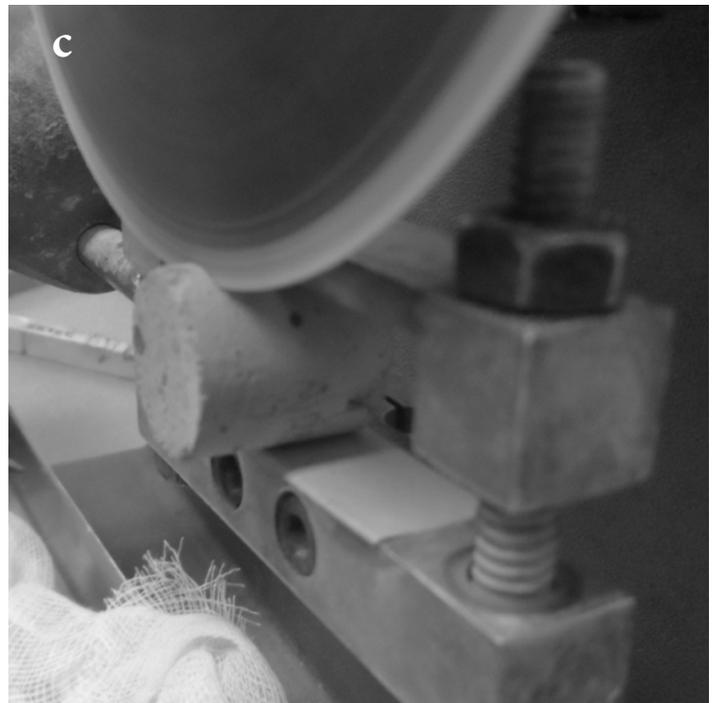
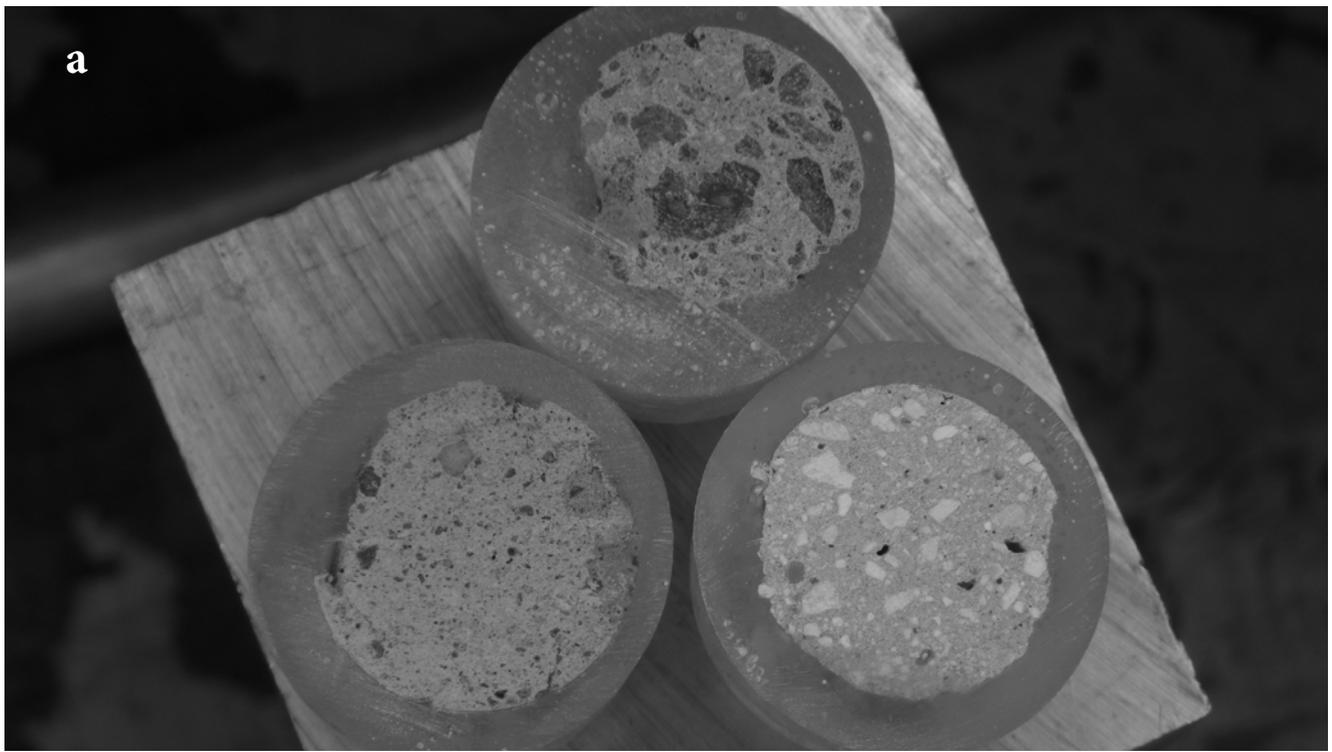
Ya realizadas las mezclas se vertieron en los moldes para su posterior fraguado y endurecimiento a temperatura y condiciones ambiente.

3.5 Probetas para Microscopía Óptica y Electrónica de Barrido.

Las secciones de las probetas preparadas para las microscopias fueron realizadas por corte mecánico siendo lo suficientemente grandes para ser representativas de la masa total de la mezcla.

El proceso para elaborar las pastillas pulidas tipo espejo para la microscopia electrónica de barrido consistió en cortar pastillas de 2 milímetros de espesor de las probetas de Mortero, las cuales fueron sometidas a la compresión. Una vez obtenidas las muestras de Mortero se embebieron en resina acrílica autopolimerizable, para después ser pulidas en diferentes suavices con las lijas numero 200, 300, 600, 1000 y 1200 así como un pulidor de paño.

► **Figura No. 26.-** Elaboración de las muestras de las mezclas de morteros para microscopia óptica, a) morteros embebidos en resina epoxica, b) proceso de pulido de las muestras, c) corte mecánico de las pastillas para microscopia óptica, d) muestras en estudio.



Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico.

3.6 Técnicas de caracterización.

Resistencia a la compresión.

La resistencia mecánica del Mortero resulta ser la propiedad de mayor relevancia en los diseños de cualquier obra arquitectónica o ingenieril, de allí la importancia que la resistencia a la compresión requiera para su calculo procesos minuciosos lo más apegados a la realidad y sin que estos produzcan equivocaciones en la practica o campo.

La resistencia a la compresión de los Morteros se desarrolla principalmente por la hidratación del cemento y la interacción que este logra con la estructura de los agregados.

Las pruebas de resistencia a la compresión al igual que el diseño de mezclas están basadas en la norma ASTM C 109, la cual establece que las pruebas de compresión deberán ser a los 3, 7, 14 y 28 días de endurecimiento. Estas pruebas fueron realizadas en una maquina universal de pruebas mecánicas modelo Shimadsu KN-100, con una velocidad de carga de 1 KN por segundo.

Los especímenes sujetos a prueba a la compresión fueron sumergidos en acetona para congelar las reacciones de fraguado lo que nos permitió el estudio de fases de hidratación mediante la microestructura cristalina en las edades a las que fueron sometidas. La absorción de la acetona en el interior del cemento poroso elimina el agua sobrante lo que genera que en las mezclas de Mortero se pare la hidratación⁶². Para realizar la microscopia electrónica de barrido las probetas se secaron a 70°C durante una hora en un horno con el motivo de evaporar todo el exceso de acetona.

La resistencia a la compresión se obtuvo al promediar el esfuerzo máximo alcanzado de tres probetas, utilizando la formula $f_c = P/A$, donde; f_c es la resistencia a la compresión, P es la carga máxima aplicada al espécimen y A es el área neta.

62 Aguado, F. E. (1996) Obtención y caracterización de nuevos cementos óseos de fosfatos de calcio en el sistema $\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Tesis de Maestria. España, E.T.S. D'ENGINYERIA INDUSTRIAL DE BARCELONA Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la UPC.

**Figura
No. 27**

Pruebas de Resistencia a la compresión.

Maquina universal de pruebas mecánicas modelo Shimadsu KN-100, con una velocidad de carga de 1 KN por segundo.

Fotografía realizada en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Microscopia Óptica

No hay muchos métodos de evaluación “visual” disponibles para el concreto excepto, posiblemente, la microscopía óptica. La mayor parte de las propiedades del concreto son evaluados, es decir, analizados de acuerdo con procedimientos y normas estándar, sin embargo la inspección visual nos puede dar grandes cantidades de información sobre el material en tan solo algunos minutos y con un solo equipo: el microscopio óptico.

Un microscopio es un dispositivo que revela detalles de un objeto más fino de lo que puede ser visto por el ojo humano. Los detalles de la distribución espacial de la porosidad y de las fases en la mezcla endurecida del concreto pueden ser visibles mediante un microscopio óptico con una resolución limitada por la longitud de onda de la luz visible, típicamente unas pocas micras.

Es así que la microscopia óptica nos ayuda a encontrar características como el tipo, cantidad, tamaño, forma, color y distribución de los agregados y la matriz cementante en las mezclas de concreto y Mortero, así como también la distribución de porosidad y micro agrietamiento. Obteniendo una caracterización visual de la macro estructura de la mezcla en estudio.

Para el estudio de los Morteros realizados en esta investigación se realizó el análisis macro estructural del material mediante un microscopio óptico marca Olympus.



**Figura
No. 28**

Equipo para microscopía Óptica.

Microscopio Óptico Olympus 8ZX15 utilizado en la experimentación.

Fotografía realizada en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

La Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) es aquella que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Esta técnica permite conocer la morfología y análisis de las partículas que constituyen los materiales en estudio.

El microscopio electrónico de barrido es básicamente una fuente de electrones que son enfocados por dos lentes condensadores hacia la muestra que se encuentra en vacío. Los electrones penetran la superficie y éstos interactúan con los átomos de la muestra, resultando la emisión de electrones o fotones de la superficie, o dicho en otras palabras, resultando en la generación de varias formas de radiación detectadas por varias ventanas. La cual es recibida en un detector móvil y que puede recorrer la muestra, y posteriormente, se transforma en imagen.

Es así que el análisis mediante la Microscopia Electrónica de Barrido es de gran relevancia ya que a nivel microscópico, las complejidades de la macro estructura del concreto y Mortero se agrandan, debido a que a esta escala el concreto y Mortero consisten en; 1 la pasta de cemento hidratado (HCP por sus siglas en inglés); 2 agregados micro finos, finos y gruesos; y 3 la interfaz entre la pasta de cemento y los agregados, también conocida como la zona interfacial de transición (ITZ).



▲ **Figura No. 29.-** Microscopio Electronico de Barrido JEOL JSM-5600LV.

En estas 3 zonas de interés su comportamiento se genera a escalas muy pequeñas, siendo por ejemplo la generación de los silicatos de calcio hidratados (C-S-H) en escalas no mayores a 100 nano metros⁶³, así como también la ITZ la cual posee dimensiones no mayores a 50 micrómetros. Es por eso la necesidad de utilizar equipos con mayor poder de resolución que puedan obtener información como la morfología y tamaños de esas importantes fases en el material.

Para el estudio de los Morteros realizados en esta investigación se realizó el análisis micro estructural del material mediante un microscopio electrónico de barrido de Ultra-Alta Resolución JSM-7800F Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope.

⁶³ Mehta, P.Q. y Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*. Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley. Tercera edición.

“ *¿Einstein? ¿O Cristo? ¿Mi
pronóstico?*

¿Dicotomía? ¿Simbiosis?

Lo que se ve claramente o se ve a medias

Y el Hombre atrapado en el medio

Es la Piel que recibe el Sol

Atravesada por los diversos Misterios;

Donde la metafísica se vuelve sangre

Lo que parecía el mal, ahora pulsa el

Bien.

El método científico encuentra

El espíritu santo que une las sustancias

Y le da nombre y lo representa en

gráficos.”

Ray Bradbury



C A P Í T U L O

4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico.



Capítulo 4. Análisis y Discusión de Resultados.

4.1 Anàlisis de resultados

Endurecimiento de Morteros elaborados con Cemento Portland adicionados con partículas sub micrométricas de minerales de fósforo (PMF) de origen natural.

En las mezclas de Mortero se ven involucradas tres diferentes fases en la estructura del material, la primera es la fase correspondiente a la Pasta de Cemento, la segunda es la fase de Transición y finalmente la fase de Agregados⁶⁴.

Como se menciona en el apartado del Marco Conceptual de esta tesis, la hidratación del cemento esta constituida principalmente por tres compuestos⁶⁵ el silicato de calcio hidratado (C-S-H) o también conocido como Tobermorita, el cual ha sufrido una reacción de hidratación convirtiéndose en un gel cementante, siendo éste el compuesto principal del cemento Portland debido al volumen total de la pasta de cemento⁶⁶ es con todo también, el responsable del fraguado y endurecimiento de la pasta de Cemento ⁶⁷⁻⁶⁸ y en consecuencia del desempeño mecánico. El segundo compuesto de importancia en la pasta hidratada es el Hidróxido de calcio (CH) o Portlandita, este compuesto genera un efecto en la

64 Judith, G.P. (2004). *Diseño de hormigones dirigido a la aplicación*. Tesina. España, Universidad Politécnica de Cataluña.

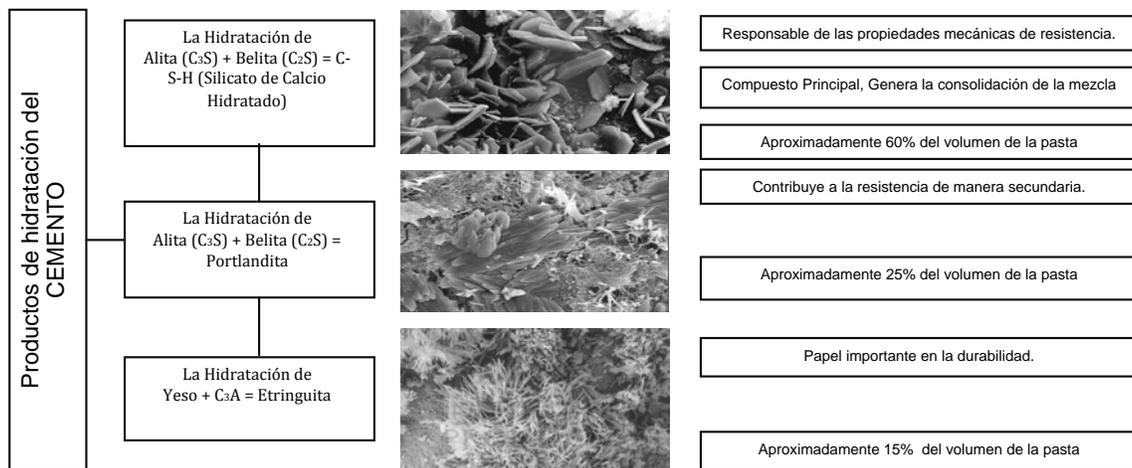
65 Hewlett, C.P. (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4ta Edicion. Elsevier Science & Technology Books.

66 Taylor, H.F.W. (2004). *Cement Chemistry*. 2da Edicion. Thomas Telford. Pag. 113.

67 Nonat A y Mutin, J.C. (1991) *Proceedings of the international RILEM Workshop in Hydration and Setting*, London, 1992; pp 171-191.

68 Jiang, S. P.; Mutin, J. C.; Nonat, A. *Cem. Concr. Res.* 1995, 25 (4), 779.

resistencia del material de manera secundaria. Y finalmente, el Trisulfoaluminato de calcio hidratado o Etringita que juega un papel menos importante dentro de la pasta de Cemento; aunque existen otras fases⁶⁹ como el Monosulfato de calcio hidratado, el aluminato de calcio hidratado y el ferroaluminato de calcio, estas fases no representan gran importancia debido a que en su conjunto son aproximadamente un 5% del volumen total de la pasta. En general al formarse las fases hidratadas en la pasta de cemento, interactúan con los áridos (arenas o gravas) anclándolos dentro de las mezclas de Mortero o concreto, en la siguiente Figura se muestra el porcentaje aproximado de productos de hidratación presentes en el la fase pasta de cemento.



▲ **Figura No. 30.-** Representación de las distintas fases de hidratación en la pasta de cemento Portland, la cual está formada principalmente por 3 productos; Silicato de calcio hidratado (C-S-H), Hidróxido de calcio (CH) y Sulfoaluminatos cálcicos, siendo estos alrededor del 95% del volumen total de la pasta.

Por otro lado se encuentra la Zona Interfacial de Transición (ITZ por sus siglas en inglés).

En las mezclas de concreto y Mortero se genera un estado plástico el cual permite manejar y moldear estos materiales, y un estado endurecido que genera las condiciones químicas, físicas y mecánicas necesarias para la obtención de la resistencia a la compresión.

En el estado endurecido del concreto y Mortero la ITZ juega un papel muy importante, ya que son las fuerzas de adherencia entre la fase pasta de cemento y la fase

⁶⁹ Taylor, H.F.W. (1990) *Cement Chemistry*, 2da Edición. Reino Unido: ThomasTelford.

de los agregados, estas fuerzas de adherencia son el resultado de una combinación o entrelazamiento mecánico provocado por las reacciones químicas de los productos de hidratación del cemento con la superficie del agregado, los cuales quedan embebidos en la pasta de cemento. Maso (1980)⁷⁰ fue el primero en estudiar la zona de transición alrededor del agregado, su investigación permitió observar que la zona de transición se forma debido al efecto de pared que inducen las relaciones agua-cemento y la movilidad de los diferentes tipos de partículas de cemento anhidro (no hidratado). Para los Morteros y concretos elaborados con Cementos Portland, la Etringita y Portlandita son los cristales más comunes en esta zona⁷¹ (ver Figura 31), los cuales pueden observarse a tempranas edades por medio de microscopía electrónica de barrido.

Mehta y Monteiro (1998)⁷², señalan que las características de las partículas del agregado tales como el tamaño, la textura superficial y el tipo de mineral predominante, influyen en las características de la zona en donde se genera la adherencia. Por ello las propiedades y el comportamiento de la ITZ tienen gran importancia en las mezclas de concreto y Mortero⁷³.

También, por su alta porosidad, la ITZ es más débil que la pasta de cemento normal, se considera entonces que la ITZ es “el eslabón más débil” de la cadena⁷⁴, por tanto, la formación de dicha zona inter-facial de transición en la proximidad de la superficie del agregado puede influir de manera negativa en la resistencia del Mortero o concreto⁷⁵.

Es así que la Zona de Transición juega un papel importante en las características del concreto y Mortero, como ya se dijo, en la resistencia mecánica, sin embargo, en los Morteros la ITZ debido al área de los agregados es menor que en el concreto⁷⁶.

70 Maso, J.-C. (1980) *Bonding between aggregates and hydrated cement paste*. Proceedings of the VIIIth International Congress on the Chemistry of Cements, 18 (7), pp. 61–64.

71 Bissonnette, B. Et al. (2016) *Concrete Surface Engineering*. 1(8). Florida: CRC Press Taylor & Francis Group.

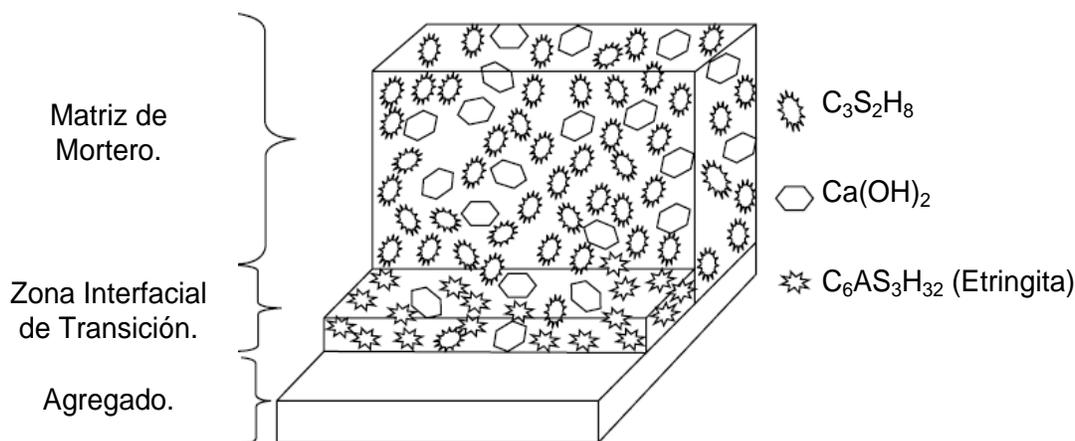
72 Mehta K. y Monteiro P. (1998). *concreto; Estructura, propiedades y materiales*, 1a edición, Instituto Mexicano del Cemento y del concreto, A.C., México, D.F.

73 Neville, A. M. (1999). *Tecnología del concreto*, 1a. Edición, Instituto Mexicano del Cemento y del concreto, A.C. México, D.F.

74 Nemati, K.M. y Gardoni, P. 2005. *Microstructural and statistical evaluation of interfacial zone percolation in concrete*. 3. strength, Fracture and Complexity.

75 Bentur, A., and Odler, I. (1996), *Development and Nature of Interfacial Microstructure*. RILEM Report 11: *Interfacial Zone in Concrete*, J. C. Mao, ed., E&FN SPON, London, England, U.K., First Edition, pp. 18-44.

76 Ozol, M.A. (1979). *Shape, Surface Texture, Surface Area, and Coatings. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, ASTM 169B, (pp. 584-625). Philadelphia: American Society for Testing and Materials



▲ **Figura No. 31.-** Representación de la Zona Interfacial de Transición (ITZ)⁷⁷, donde se observa una acumulación de Etringita que son productos de hidratación los cuales físicamente tienen la morfología de varillas o agujas largas y finas, que se entrelazan unas con otras generando un entramado mecánico con la superficie de los agregados, haciéndose más denso conforme se hidrata el cemento, y que, cuando endurece, genera la adherencia entre la pasta y el agregado. Extraído con fines didácticos de C.A. and Roy, D.M., Morphology and microstructure of cement paste/rock interfacial regions. In: Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. III, Septima edn., Paris, France, 1980, pp. VI-127–VII-132.

La tercera fase en las mezclas de Mortero son los agregados, los cuales hacen económicamente viable el uso de concretos y Morteros ya que representan más de un 70% del volumen total de las mezclas. En este caso, son de gran importancia las características físicas, químicas, mecánicas como la forma, tamaño, textura, y muy importante, la dureza de los materiales utilizados, finalmente, dentro las características químicas se recomienda que los agregados no reaccionen con la pasta de cemento. Sin embargo, diversas investigaciones han proporcionado evidencia de reacciones químicas entre el cemento y los agregados, por ejemplo, para agregados silíceos, Suzuki y Mizukami (1975,1976)^{78, 79} mencionan que los productos de hidratación formados, varían con diferentes agregados considerando una interacción química adicional entre el agregado y el cemento. Scholer (1967)⁸⁰ sugirió (basado en datos de resistencia de unión entre agregados) que los áridos silíceos producen más enlaces químicos. Alexander et al. (1968)⁸¹ mencionan la existencia

77 Imagen obtenida de Langton, C.A. and Roy, D.M., Morphology and microstructure of cement paste/rock interfacial regions. In: Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. III, Septima edn., Paris, France, 1980, pp. VI-127–VII-132.

78 Suzuki, M., and Mizukami, K. (1975). Bond strength between cement paste and aggregate. 29. Cem. Assoc. Japan. Pag. 94-96.

79 Suzuki, M. and Mizukami, K. (1976). Bond strength between cement paste and aggregates. 30. Cem. Assoc. Japan. Pag. 211-213.

80 Scholer, C.F. (1967). The role of mortar-aggregate bond in the strength of concrete. Highw. Res. Rec. 210. Pag. 108-117.

81 Alexander, K.M. et al. (1968). Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete.

de una reacción puzolánica entre el cemento y rocas silíceas. Schwiere et al. (1968)⁸² demostraron la formación de gel C-S-H por reacción química entre el cuarzo y una solución de hidróxido de calcio, e indicaron que podría ocurrir una reacción similar en las mezclas de concreto. También Chatterji y Jeffrey (1971)⁸³ indicaron que un agregado silíceo proporciona parte del material necesario para la formación de gel C-S-H, y por lo tanto, producen mayor adherencia.

Para los agregados carbonatados se han mencionado reacciones químicas, las cuales constan en la transformación de la calcita superficial en hidróxido de calcio, debido al ataque de la roca carbonatada por soluciones alcalinas de la pasta de cemento^{84, 85}.

En nuestro caso, para averiguar la interacción y la evolución de las diferentes fases que se generan durante el proceso de endurecimiento de los dos tipos de mezclas de Mortero elaboradas en la presente investigación, es decir, Morteros con adición de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo (PMF) de origen natural y sin la adición de estas partículas (mezcla de referencia), se hicieron pruebas mecánicas de compresión y análisis macro y micro estructurales mediante Microscopia Óptica y Microscopia Electrónica de Barrido en un periodo de 7 a 28 días.

International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, London. Pag. 59-81.

82 Schwiete, H.E.; Ludwig, U.; and Albeck, J. 1968. Die Bindung von Zuschlagstoffen an Zementstein. *Wiss. Z. Tech. Univ. Dresden*. 17(6): 1587-1590.

83 Chatterji, S. and Jeffery, J.W. 1971. The nature of the bond between different types of aggregates and Portland cement. *Indian Concr. J.* 45(8): 346-349.

84 Farran, J.; Javelas, R.; Maso, J.C.; and Perrin, B. 1972. Existence d' une aureole de transition entre les granulats d'unmortier, ou d'un b-ton, et la masse de la p-te de ciment hydrate. *Cons6quences sur les propri-t-s m@ caniques*. C.R. Acad. Sc. Ser. D. 275: 1467-1469.

85 Buck, A.D., and Dolch, W.L. 1966. Investigation of a reaction involving nondolomitic limestone aggregate in concrete. *J. Am. Concr. Inst.* 63 (7): 755-763.

Pruebas de resistencia a la compresión del Mortero de referencia y del Mortero con la adición de partículas sub micrométricas PMF.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a la compresión de los dos tipos de mezclas de Mortero. Medimos la resistencia máxima a la fractura como función del tiempo de endurecimiento. Los experimentos se realizaron a los 3, 7, 14 y 28 días; de acuerdo con la norma correspondiente *ASTM C 109/C 109M, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*.

Para una buena interpretación, los resultados de las pruebas a compresión deben de ser correctamente analizados tanto en investigación básica como en estudios de rutina en obra. En el caso del concreto, la resistencia de las probetas de control es generalmente la única evidencia de la calidad estructural de una construcción, tal como lo establece el ACI (Instituto Americano del concreto por sus siglas en Inglés) Committee 214. Por consiguiente los datos sobre la resistencia a la compresión son importantes para establecer un criterio, pero debe tenerse en cuenta cuales son sus limitaciones⁸⁶.

El análisis estadístico proporciona elementos muy prácticos para la valoración de los resultados de los ensayos de resistencia a la fractura. Aplicar este método de análisis de datos permite fijar especificaciones de resistencia de materiales de construcción lo más realistas posibles. A continuación, en la Tabla 4, se muestra el análisis estadístico realizado para la población de probetas ensayadas de los Morteros bajo estudio. En este caso se aplicó la “*Guía para la Evaluación de los resultados en la prueba de resistencia a la compresión de concretos*”⁸⁷.

86 Además de las variaciones fortuitas, los resultados de tales ensayos están generalmente sometidos a dos principales causas de variación: variaciones en las propiedades de los constituyentes del concreto que se está ensayando, y discrepancias en los métodos de ensayo. Por ejemplo, cambios en la relación agua/cemento, falta de uniformidad en la granulometría de los áridos, variaciones en las características del cemento, variaciones en la temperatura y condiciones de curado durante el amasado del cemento, confección de las probetas y el período de endurecimiento así como cierta ineficacia en la realización de la mezcla.

87 Método recomendado para evaluar los resultados de los ensayos de compresión del hormigón en obra. ACI 214-65. ACI Manual of Concrete Practice, part 1. American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA (1968).



	DATOS		FUNCIONES ESTADÍSTICAS				VARIACIONES DE RESISTENCIA		
	Días de endurecimiento	No. De Probeta	Resistencia a la compresión (Mpa)	Media (Mpa)	Resistencia a la compresión en porcentaje (%)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Factor d2	Coefficiente de Variación Corregido
Mezclas de referencia	3 días	Probeta A	15.26	15.3	100	0.39	2.56	1.693	1.51
	3 días	Probeta B	15.71						
	3 días	Probeta C	14.93						
	7 días	Probeta A	22.08	21.56	100	0.92	4.27	1.693	2.52
	7 días	Probeta B	22.11						
	7 días	Probeta C	20.5						
	14 días	Probeta A	22.61	20.83	100	2.3	11.2	1.693	6.61
	14 días	Probeta B	18.19						
	14 días	Probeta C	21.69						
	28 días	Probeta A	20.94	20.23	100	0.98	4.86	1.693	2.87
28 días	Probeta B	20.65							
28 días	Probeta C	19.11							
Mezclas con 1% PMF	3 días	Probeta A	18.15	17.06	111.5	1	5.85	1.693	1.51
	3 días	Probeta B	16.19						
	3 días	Probeta C	16.84						
	7 días	Probeta A	20.76	21.27	98.66	0.45	2.12	1.693	1.51
	7 días	Probeta B	21.46						
	7 días	Probeta C	21.6						
	14 días	Probeta A	23.81	23	110.4	0.93	4.02	1.693	1.51
	14 días	Probeta B	23.19						
	14 días	Probeta C	21.99						
	28 días	Probeta A	20.84	23.58	116.54	2.39	10.12	1.693	5.98
28 días	Probeta B	24.7							
28 días	Probeta C	25.2							

▲ **Tabla No. 4.-** Análisis estadístico de las pruebas a compresión realizadas a las probetas de mezclas de Mortero bajo estudio.

Los resultados obtenidos mediante el mínimo de probetas testeadas de una mezcla (como lo es el caso de estudio donde solo se ensayaron tres probetas por día de endurecimiento), proporcionan datos insuficientes para el análisis estadístico y, como con cualquier estimador estadístico, la confianza en la estimación es una función de la cantidad de resultados de la prueba.

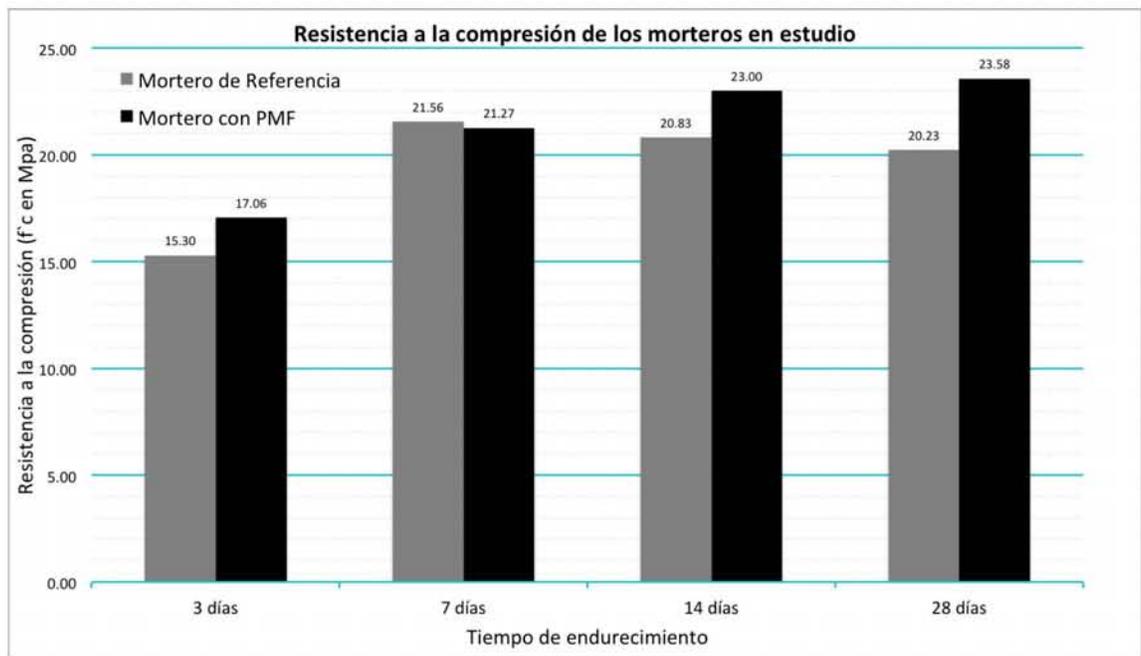
Aunque normalmente el mínimo de muestras para obtener estadísticas confiables en mezclas de concreto es de 30 probetas por día de envejecimiento, cuando se analizan

menos de 10 ejemplares se deben realizar las correcciones correspondientes debido a una serie de factores de carácter aleatorio que hacen imposible fabricar dos mezclas exactamente iguales, siendo características presentes la no uniformidad y la variabilidad. Para esto se recurre al control estadístico de procesos, en cual se obtiene un coeficiente de variación que puede ser utilizado como un índice del grado de control y el estándar general de la calidad del concreto realizado. La Tabla No 5, según el ACI (Instituto Americano del concreto por sus siglas en Inglés) Committee 214, muestra el coeficiente de variación que puede esperarse en proyectos vigilados. Las clasificaciones de control se basan en la experiencia adquirida con un gran número de proyectos y se presentan como una guía general para evaluar el control del concreto (Ver anexo 1)

Clase de operaciones	Coeficiente de variación para los diferentes estándares de control			
	excelente	bueno	medio	pobre
Variación total:				
(I) construcción en general	inferior a 10.0	10.0 a 15.0	15.0 a 20.0	sobre 20.0
(II) control de laboratorio	inferior a 5.0	5.0 a 7.0	7.0 a 10.0	sobre 10.0
Variaciones dentro de una misma mezcla:				
(I) control en obra	inferior a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	sobre 6.0
(II) control de laboratorio	inferior a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	sobre 5.0

▲ **Tabla No.5.-** Estándares de control del concreto, ACI committee 214.

De acuerdo a lo anterior y a los coeficientes de variación obtenidos en los cálculos, podemos decir que la calidad detectada en las muestras elaboradas en el laboratorio es excelente para la mezcla con el aditivo PMF y buena para la mezcla sin aditivo a los 28 días de endurecimiento.



▲ **Figura No.32.**— Gráfica de la resistencia a la compresión a los 3, 7, 14 días de endurecimiento de las mezclas de Mortero con aditivo y de referencia.

En la gráfica de la Figura 32 se muestra la variación del esfuerzo a la fractura de los Morteros de cemento de referencia (barras grises) y los Morteros de cemento con aditivo (barras negras) como función del tiempo de endurecimiento medido hasta los 28 días de acuerdo a la norma ASTM C-109. Tres hechos se pueden destacar de estos resultados:

- El primero es que a los 28 días de endurecimiento, el Mortero con aditivo muestra mayor resistencia a la fractura (24.23 MPa) que el Mortero de referencia (20.23 MPa). Esto indica que el aditivo hecho de PMF mejora el desempeño mecánico de los Morteros.

- El segundo es que solo son necesarios 14 días para obtener el nivel máximo de resistencia a la compresión en el Mortero con aditivo PMF, lo cual resulta ser muy benéfico en los procesos constructivos generando ventajas técnicas como lo son tiempos de construcción en elementos estructurales y tiempos de descimbrado.

- El tercero, muy importante, es que con este procedimiento se obtienen Morteros con resistencias a la compresión mayores a las que debe cumplir un Mortero de uso estructural tipo I (18.8 MPa) según los requisitos que establece la norma mexicana NMX-C-486, de hecho, la resistencia a la compresión que se obtiene es muy cercana a la

de concretos estructurales clase I (25MPa), establecido en el Reglamento de Construcción del Distrito Federal.

Finalmente, y como se menciona en apartados anteriores, investigaciones realizadas en el Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales del IFUNAM, ya habían demostrado que la adición de minerales de fósforo en forma de partículas sub-micrométricas favorece el desempeño mecánico de pastas de cemento tipo Portland. Aquí hemos comprobado que se obtiene el mismo resultado para el caso de los Morteros.

Análisis de las mezclas de Mortero mediante Microscopía Óptica y Microscopía Electrónica de Barrido.

Introducción

Iniciaremos explicando brevemente la importancia que tiene la estructura macro, micro y nano en las propiedades de los concretos y de los Morteros y dando una justificación del por qué el empleo de la microscopía para el desarrollo de nuevos materiales de construcción basados en Cementos.

En la actualidad la industria de la construcción demanda una serie de características y propiedades físico-químicas de los materiales que emplea, sabemos que el concreto es uno de los materiales más importantes en esta industria, también es uno de los materiales que más demanda investigaciones y modificaciones en su estructura para obtener beneficios cada vez más importantes como lo son, altas resistencias a la compresión, resistencia ante la corrosión, una buena adhesión entre sus elementos, soportar ambientes físicos, químicos y biológicos agresivos.

Los recientes avances en el campo de la Ciencia e Ingeniería de Materiales han mostrado que las propiedades de los materiales tiene su origen en su microestructura, y en particular, la investigación en el campo de las nano-Ciencias han permitido el desarrollo nuevos materiales cementantes mediante la adición de partículas nano-métricas^{88, 89 90}.

88 Constantinides, G. et. al. (2003). On the use of nanoindentation for cementitious materials, *Concrete Science & Engineering, Materials & Structures, RILEM*, (36), Pag. 191–196.

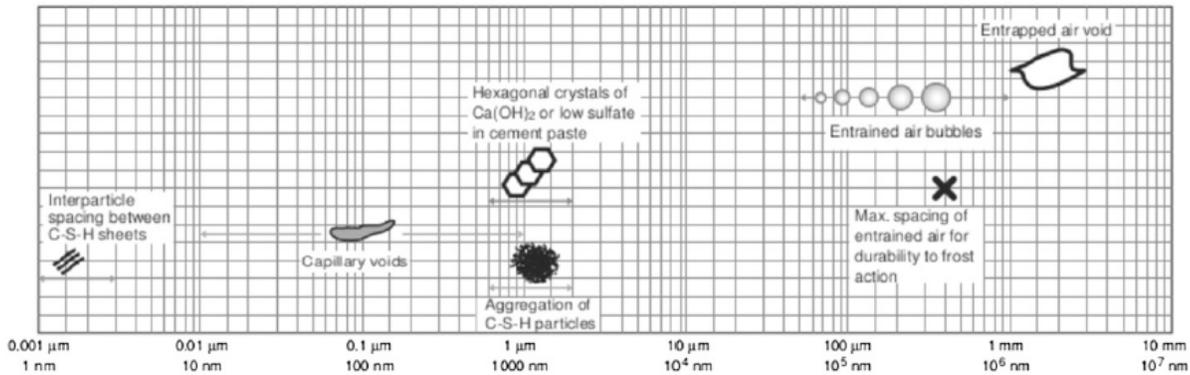
89 Ulm, F. et. al. (2007). Statistical Indentation Techniques for Hydrated Nanocomposites: Concrete, Bone and Shale. *J. American Ceramic Society*, 90(9), Pag. 2677–2692.

90 Constantinides, G., y Ulm, F. (2004). The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement based



Los concretos y Morteros son materiales compuestos formados por dos matrices hechas de materiales cerámicos (matriz agregados y matriz cementante), esto hace que este tipo de materiales sea altamente heterogéneos, con estructuras complejas caracterizadas por el tipo, cantidad, tamaño, forma y distribución de sus componentes (cemento, agua y agregados). Sin embargo la relación entre los componentes y como interactúan entre ellos todavía no se ha entendido por completo. Por lo tanto, es necesario continuar investigando alrededor de este tema para comprender propiedades importantes como la resistencia a la compresión, elasticidad, contracción, deformación, agrietamiento y durabilidad.

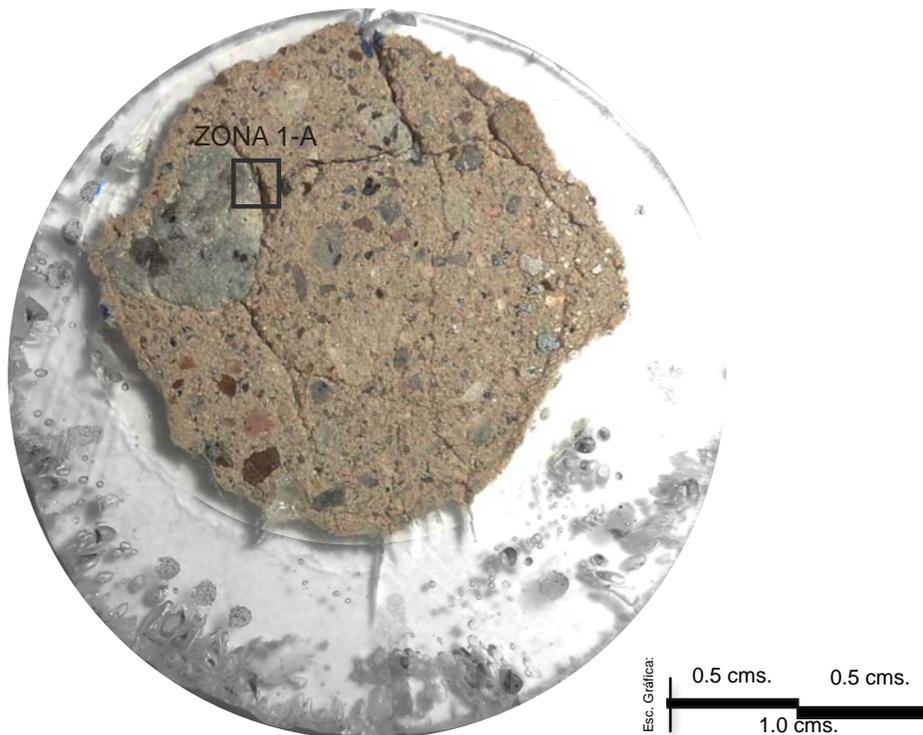
Una primera aproximación es la evaluación macroscópica de la estructura de los Cementos y Morteros. A esta escala (visible al ojo humano $>200\mu\text{m}$) solo se es posible reconocer dos parámetros que son de importancia, las proporciones relativas de diversos grados de agregados y las formas en que éstos generan la red permeable del material en la matriz cementante. Es así que para poder resolver preguntas como; ¿Por qué “pega” el cemento?, ¿Por qué el Mortero y el concreto pueden resistir grandes fuerzas a la compresión y no a la flexión o tensión?, ¿Por qué en una mezcla de concreto o Mortero el mayor volumen de material es de agregados y no de cemento?, ¿Por qué a menor relación agua-cemento la resistencia a la compresión aumenta?, es necesario evaluar la estructura a nivel microscópico y nanoscópico ($\leq 100\mu\text{m}$). A nivel nano y micro-estructural, tanto en Morteros como en concretos se identifican tres fases de importancia, la fase pasta de cemento y sus reacciones de hidratación, la zona inter-facial de transición y su porosidad, y finalmente la fase de los agregados y su empaquetamiento. Para el análisis y estudio a estas escalas se necesitan técnicas y equipos especializados como lo son el microscopio óptico, el microscopio electrónico de barrido, la difracción de rayos x y otras técnicas espectroscópicas.



▲ **Figura No. 33.-** Representación de las dimensiones de los componentes del concreto y Mortero a escalas micro y manométricas. Extraído con fines didácticos de X.V. Vu, Y. Malecot, L. Daudeville, Strain measurements on porous concrete samples for triaxial compression and extension test under very high confinement, J. Strain Anal.

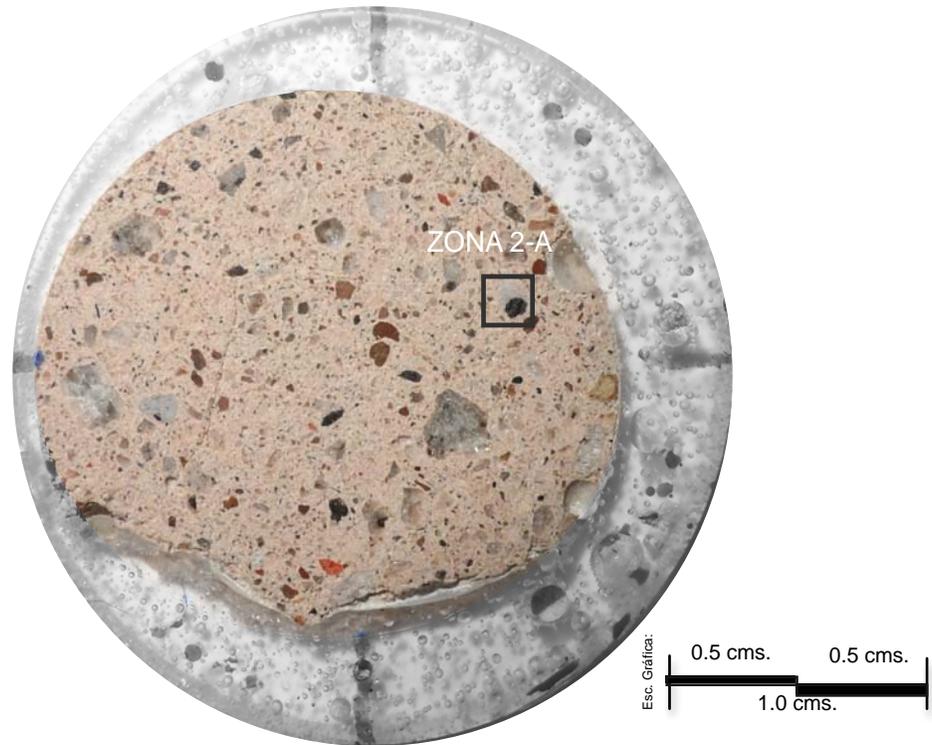
A continuación presentamos las observaciones de la microestructura mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido y su análisis.

Macro estructura de los Morteros; Microscopia Óptica a los 28 días de endurecimiento.



▲ **Figura No.34-A.-** Aspecto de la Macro estructura de la sección pulido tipo espejo de los Morteros estudiados a 28 días de endurecimiento sin aditivo.





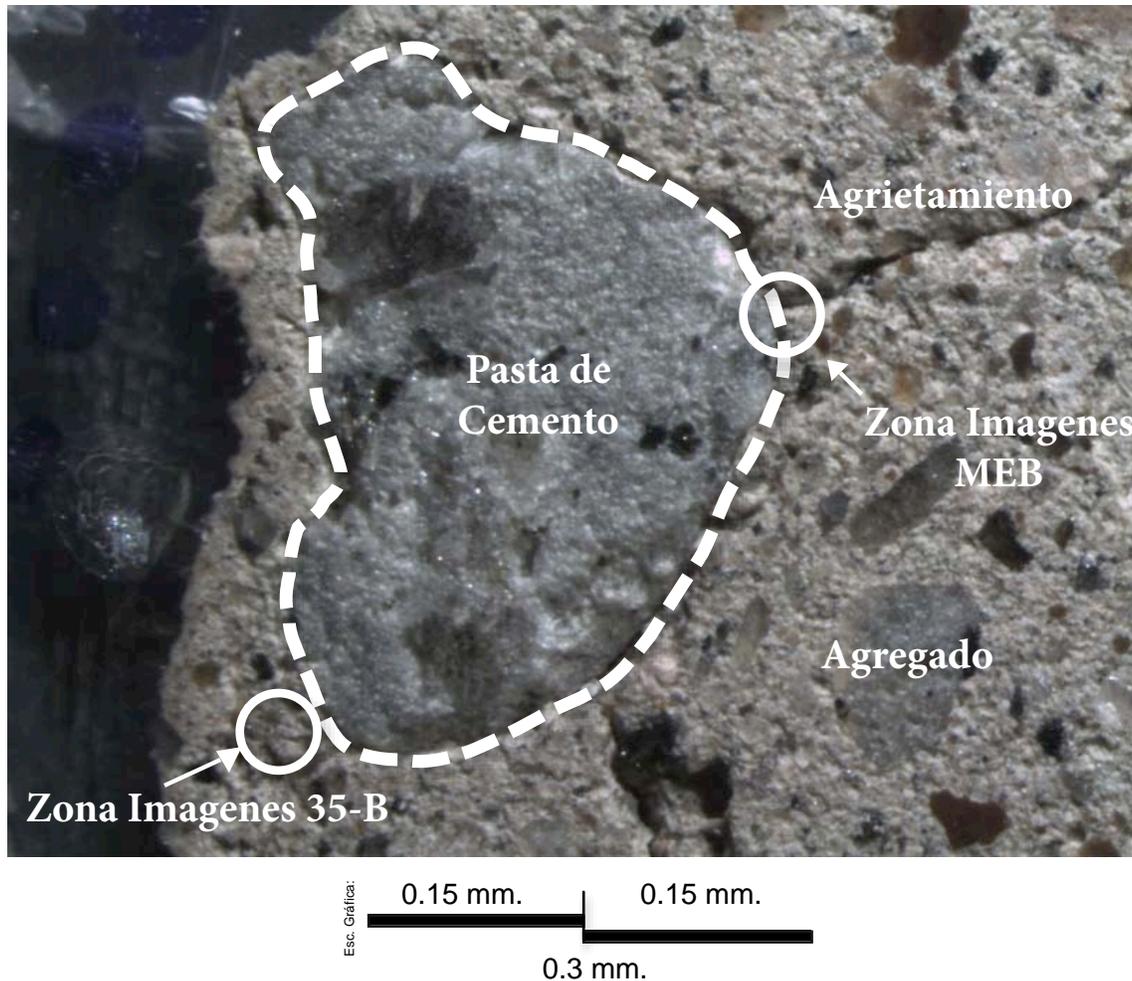
▲ **Figura No.34-B.-** Aspecto de la Macro estructura de la sección pulido tipo espejo de los Morteros estudiados a 28 días de endurecimiento con aditivo PMF.

En la Figuras 34-A y 34-B se muestran dos secciones pulidas tipo espejo de los Morteros sin aditivo (Figura 34-A) y los Morteros con aditivo (Figura 34-B), ambas fueron embebidas en resina epóxica para facilitar el proceso de pulido. A simple vista, se pueden apreciar las diferencias en la macro estructura de ambos Morteros. Por ejemplo, el tamaño y la distribución de partículas es más homogénea en el Mortero con aditivo (Figura 34-B) que en el Mortero sin aditivo (Figura 34-A), en particular, en el Mortero sin aditivo, en la parte superior izquierda aparece una zona gris de gran tamaño, a partir de la cual surgen dos grandes grietas que recorren toda la sección de la muestra. En la muestra con aditivo también se observan ese tipo de zonas grises pero son de menor tamaño y están distribuidas más homogéneamente, además, el proceso de agrietamiento no es tan claro como en la muestra sin aditivo. Lo mismo se observa con la distribución de los agregados finos que aparecen con coloración variable debido a sus diferentes composiciones mineralógicas.

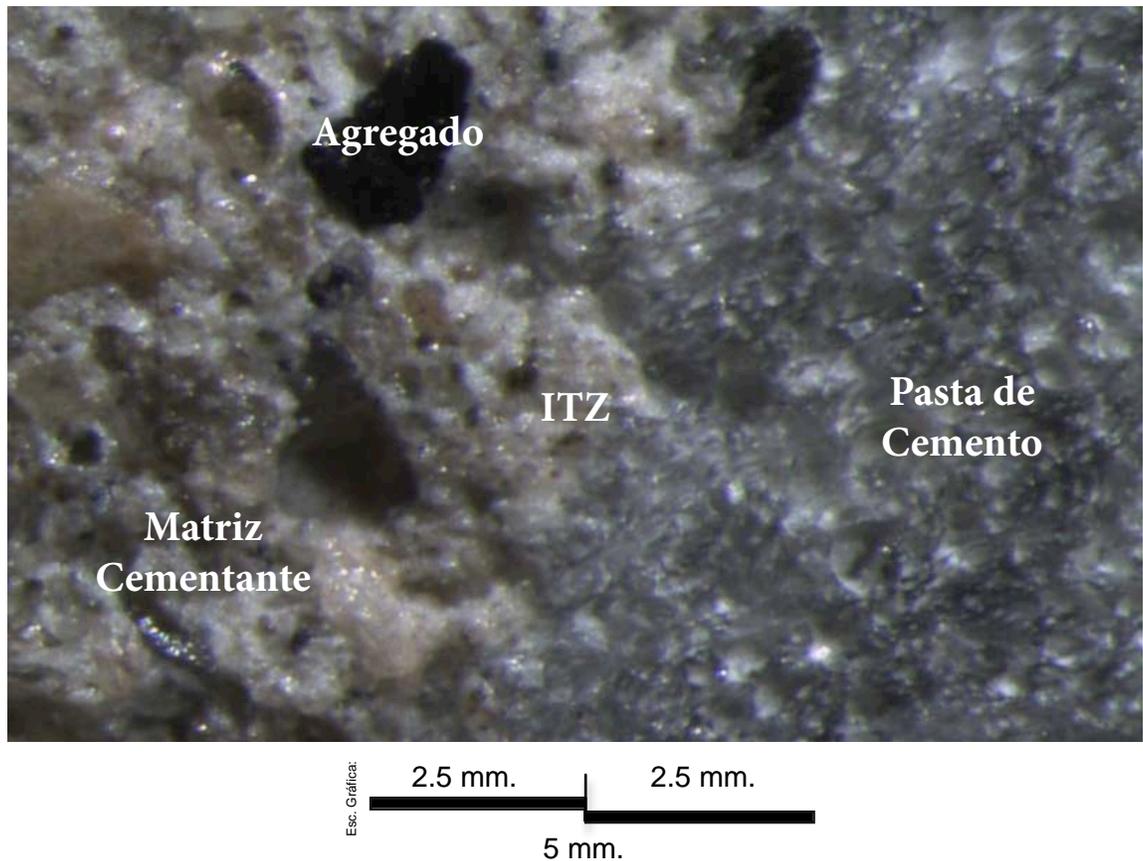
Analizaremos ahora con más detalle y a mayor ampliación de imagen, las zonas

marcadas como 1-A y 2-A en la Figura 35-A y 35-B. Escogimos estas zonas debido a que en ellas se aprecian las tres fases descritas previamente, es decir, la fase pasta de cemento, la fase de agregados y la Zona Interfacial de Transición (ITZ por sus siglas en inglés).

Macro estructura de los Morteros sin aditivo; Microscopia Óptica a los 28 días de endurecimiento, Zona 1-A (Morteros sin Aditivo).



▲ **Figura No.35-A.-** Microscopia Óptica a los 28 días de endurecimiento de la mezcla de Mortero sin aditivo Zona 1-A, Limitada por una línea punteada aparece una zona gris que podría corresponder a una cúmulo de pasta de Cemento.



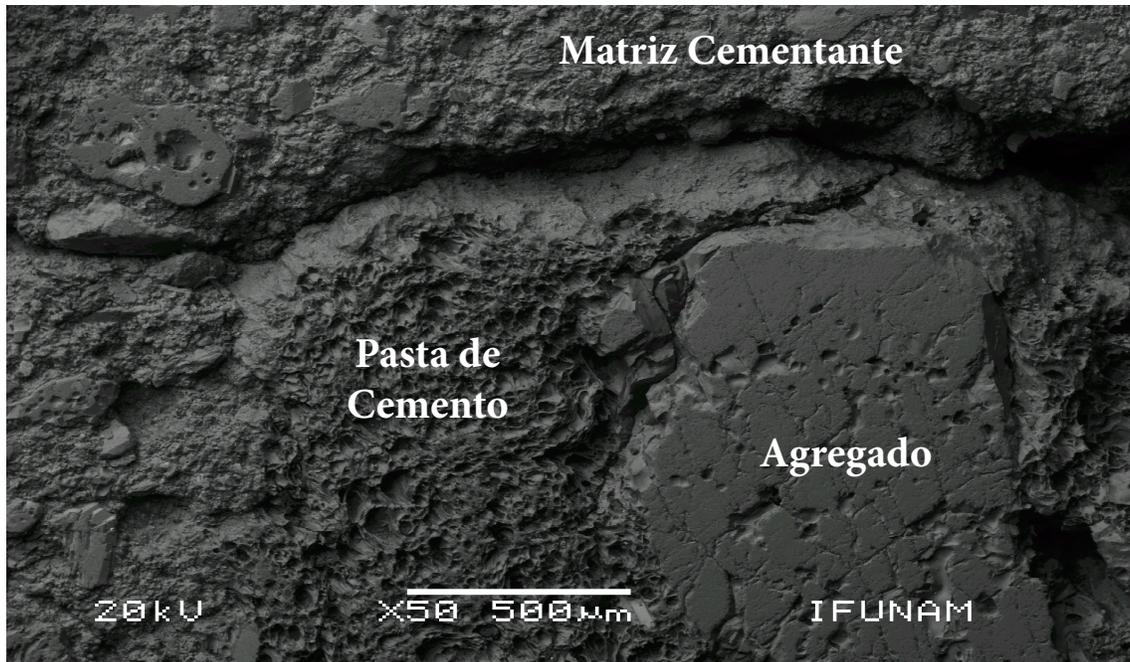
▲ **Figura No.35-B.-** Microscopía Óptica a los 28 días de endurecimiento de la mezcla de Mortero sin aditivo Zona 1-A, Figura (35-B) corresponde al punto marcado con una flecha en la imagen de la Izquierda amplificado. Este punto corresponde a una zona de transición.

Iniciamos con la zona marcada como 1-A en donde se observa una región grisácea que al parecer corresponde a un cúmulo de pasta de cemento. Primero analizaremos las imágenes de microscopía óptica (Figuras 35-A y 35-B) y posteriormente las imágenes de microscopía electrónica de barrido (Figura 36, imágenes A, B, C y D).

La zona grisácea aparece inmersa en un conglomerado de agregados pétreos mezclados con material cementante básicamente formado por C-S-H (imagen 35-A) y aunque en general parece haber un buen acoplamiento de este cúmulo con el resto de los materiales del Mortero (ver imagen 35-B), alrededor de esta zona es evidente la presencia de al menos dos sitios de nucleación de grietas de gran tamaño, lo que indica la presencia de puntos altamente débiles en la región de acoplamiento ITZ de la pasta de Cemento con el resto de los materiales. El análisis mediante Microscopía Electrónica de Barrido

confirma esto último, como veremos a continuación.

Micro estructura de los Morteros sin aditivo; Microscopia Electrónica de Barrido a los 28 días de endurecimiento, zona 1-A (Mortero sin Aditivo).



▲ **Figura No. 36-A.-** Imágen de Microscopia Electrónica de Barrido a 50 ampliificaciones mediante rayos dispersados a bajo vacio en la Zona 1-A tomada en la muestra de Mortero sin aditivo a los 28 días de endurecimiento, donde se observan claramente un agregado, una area de aglomeracion de cemento y la matriz cementante.

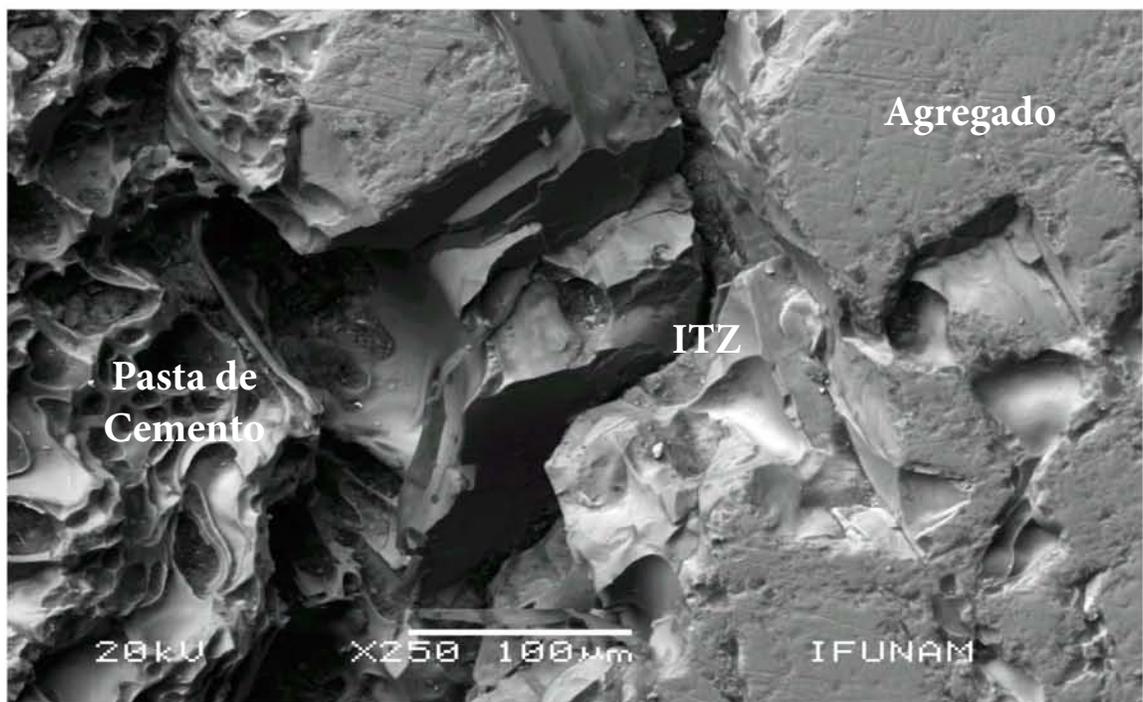


▲ **Figura No. 36-B.-** Imágen de Microscopia Electrónica de Barrido a 250 ampliificaciones mediante rayos dispersados a bajo vacio en la Zona 1-A tomada en la muestra de Mortero sin aditivo a los 28 días de endurecimiento, donde se observa la morfología de la pasta de cemento.





▲ **Figura No. 36-C.-** Imágen de Microscopia Electrónica de Barrido a 1400 ampliificaciones mediante rayos dispersados a bajo vacio en la Zona 1-A tomadas en la muestra de Mortero sin aditivo a los 28 días de endurecimiento, donde se observa la porosidad en la morfología de la pasta de cemento.



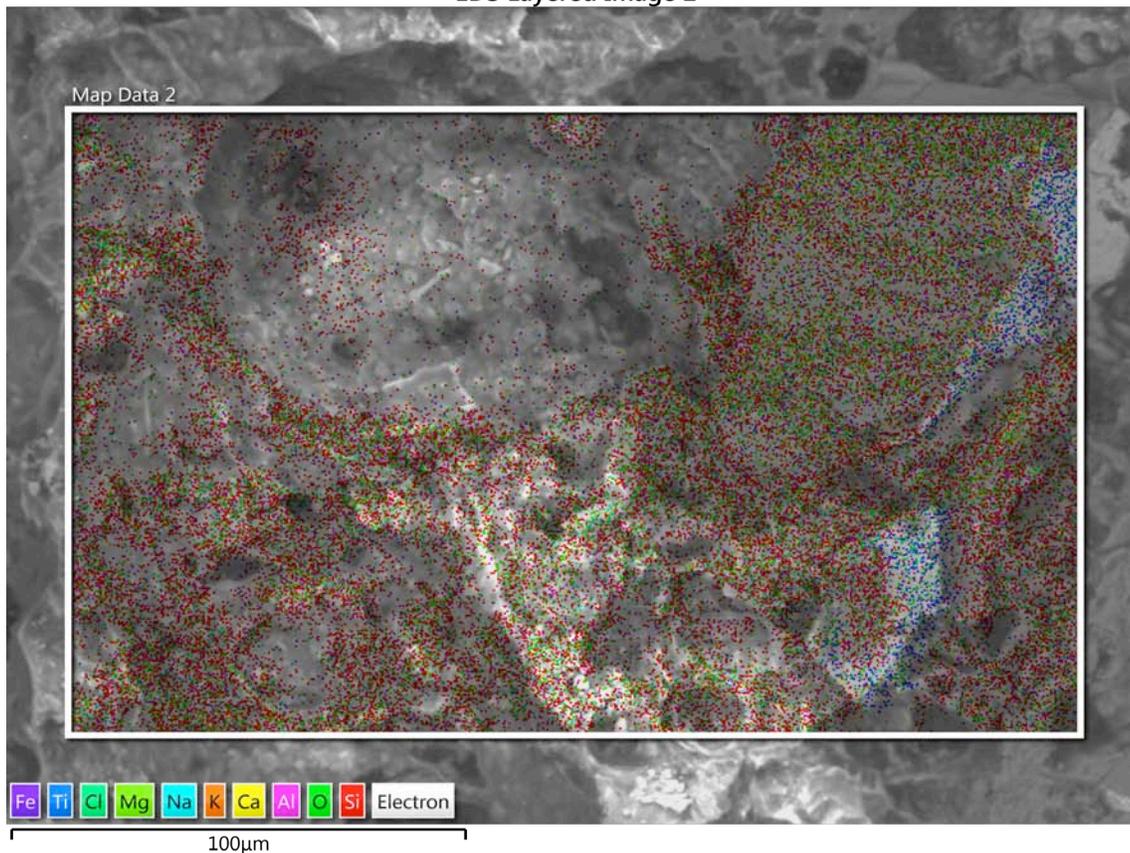
▲ **Figura No. 36-D.-** Imágen de Microscopia Electrónica de Barrido a 250 ampliificaciones mediante rayos dispersados a bajo vacio en la Zona 1-A tomadas en la muestra de Mortero sin aditivo a los 28 días de endurecimiento, donde se observa las tres fases principales del mortero, fase pasta de cemento, fase de agregados y la ITZ.

La imagen A de la Figura 36 muestra la microestructura en un punto de la zona 1-A cercana al inicio de una grieta. En esta imagen, aparecen un agregado, una región

correspondiente al cúmulo de pasta de Cemento y las grietas que se forman en la interface de estos dos materiales. En las imágenes B y C, aparece con mas detalle la estructura del cúmulo de la pasta de Cemento, en ella se aprecia la presencia de una alta densidad de poros con tamaños superiores a 30 μm . Finalmente, en la imagen D se observa la interface (ITZ) entre la pasta y el agregado con gran cantidad de grietas.

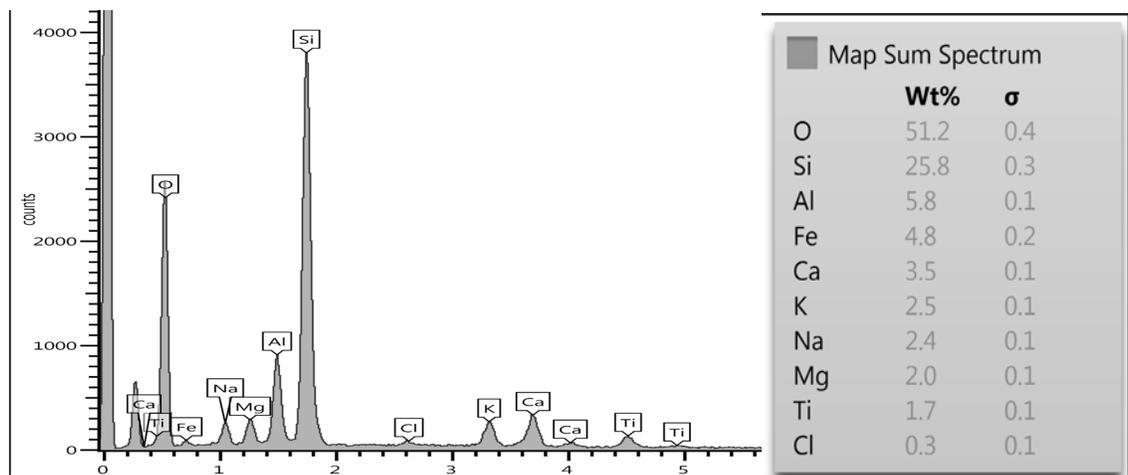
Por otra parte, el análisis elemental mediante Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS por sus siglas en inglés) entre la interface de la pasta de Cemento y el agregado indica una alta concentración de Silicatos, ya que la relación Ca/Si es del orden de 0.13 (Figura 37A y 37-B). Esto sugiere que en esa región debe haber poco aglutinante del tipo C-S-H, ya que para que este gel se forme, la relación Ca/Si debe estar entre 1.5 y 2^{96,97}. Estos resultados nos llevan a la conclusión de que la fragilidad que se observa en la zona estudiada se debe a la alta porosidad observada en la pasta de Cemento y a la poca adherencia de esta con los agregados por la poca presencia de material cementante C-S-H.

EDS Layered Image 2



▲ **Figura No. 37-A.-** Espectrometría de Dispersión de Energía (EDS) en la interface de la zona de estudio 1-A.

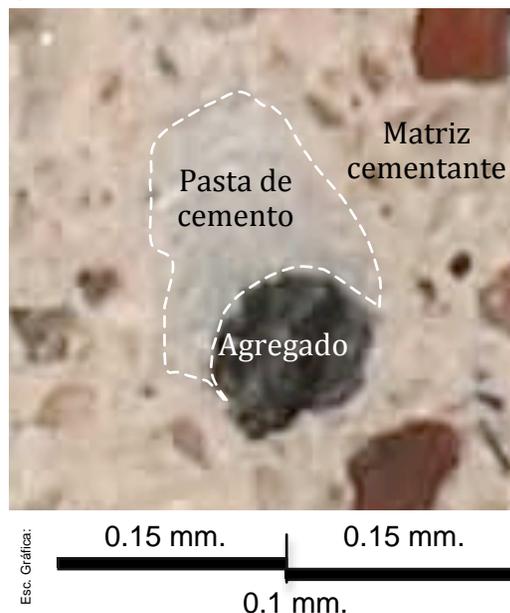




▲ **Figura No. 37-B.-** Espectrometría de Dispersión de Energía (EDS) en la interface de la zona de estudio 1-A.

Pasamos a analizar ahora la zona 2-A (Ver Figura 28-B) correspondiente al Mortero con Aditivo PMF. En este caso tenemos también un aglomerado de pasta de Cemento junto a un agregado (ver Figura 38). Como en el caso anterior, la zona fue analizada mediante microscopía óptica y electrónica de Barrido (Figura 39 Imágenes A, B, C y D)

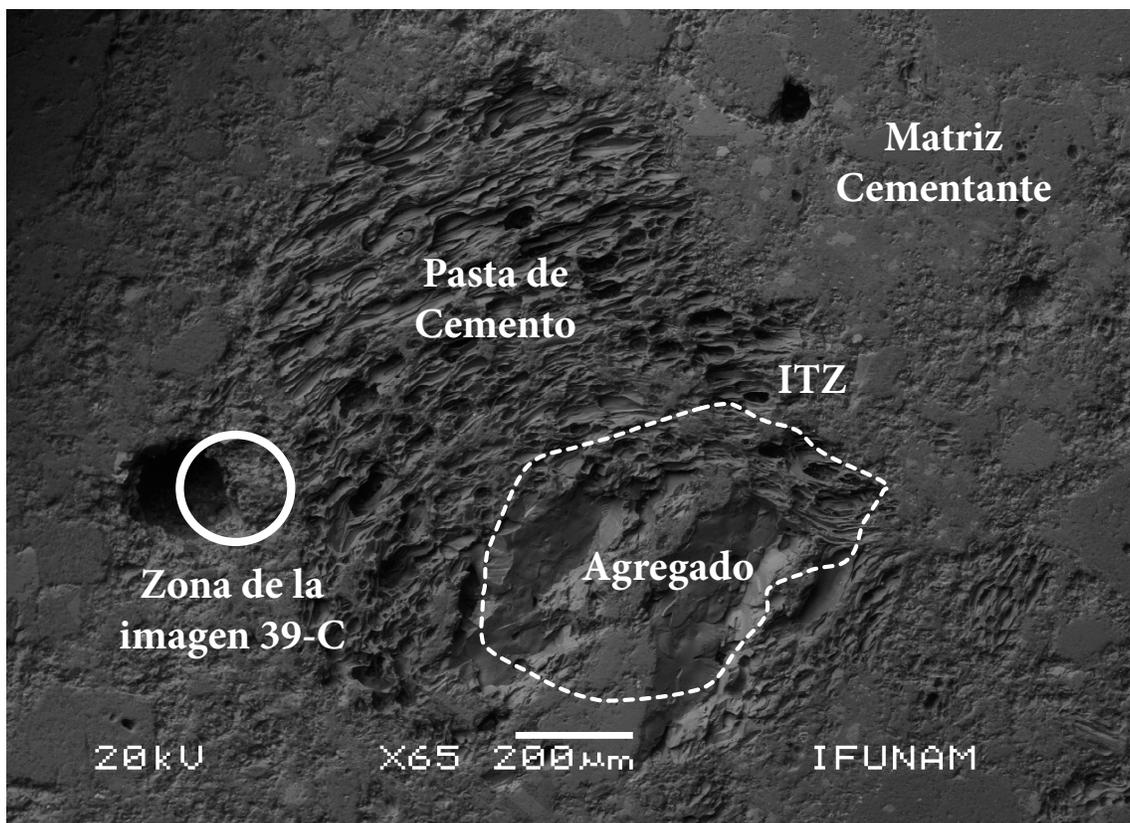
Macro estructura de los Morteros con aditivo; Microscopia Óptica a los 28 días de endurecimiento, Zona 2-A (Morteros con PMF)



▲ **Figura No. 38.-** Imagen de microscopia Óptica a los 28 días de endurecimiento de la mezcla de Mortero con aditivo (Figura 28 Zona 2-A). La región encerrada por la línea punteada corresponde a un cúmulo de pasta de Cemento.

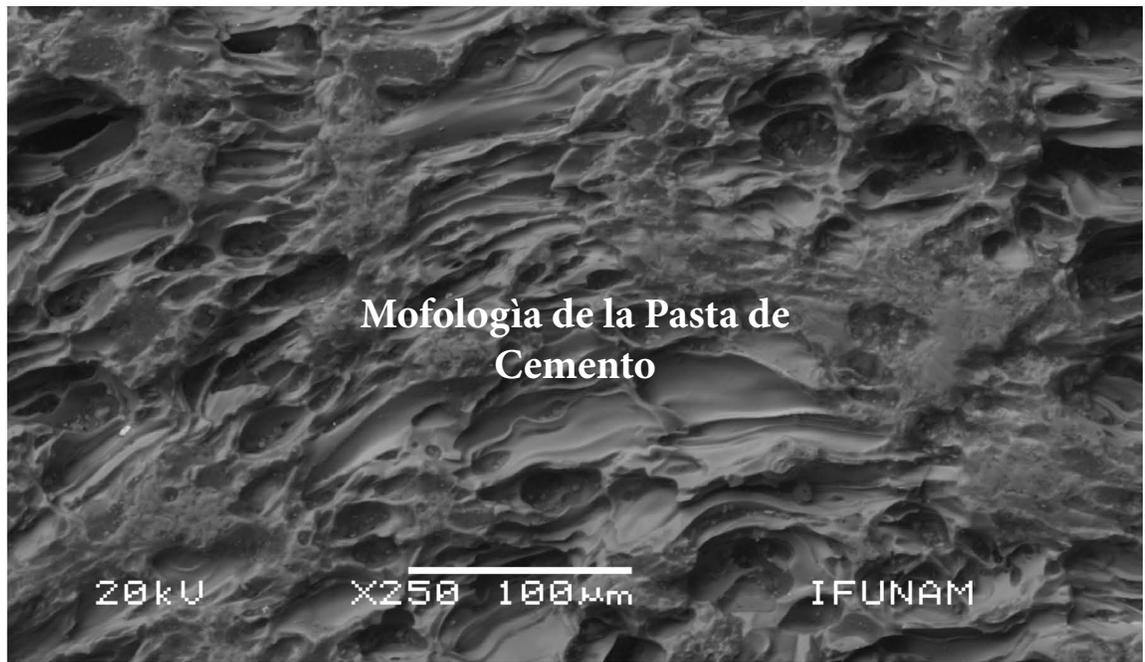
En la Figura 38 se observa una zona de pasta de Cemento de mucho menores dimensiones que las que se observa en el Mortero sin aditivo. En este caso no se observan regiones de inicio de agrietamiento en la frontera que separa a la pasta y al agregado. También se observan limos y arcillas en combinación con fases hidratadas de Cemento y embebidos aparecen agregados de colores café, negro y ocre.

Micro estructura de los Morteros con aditivo; Microscopia Electrónica de Barrido a los 28 días de endurecimiento, Zona 2-A, (Morteros con PMF).

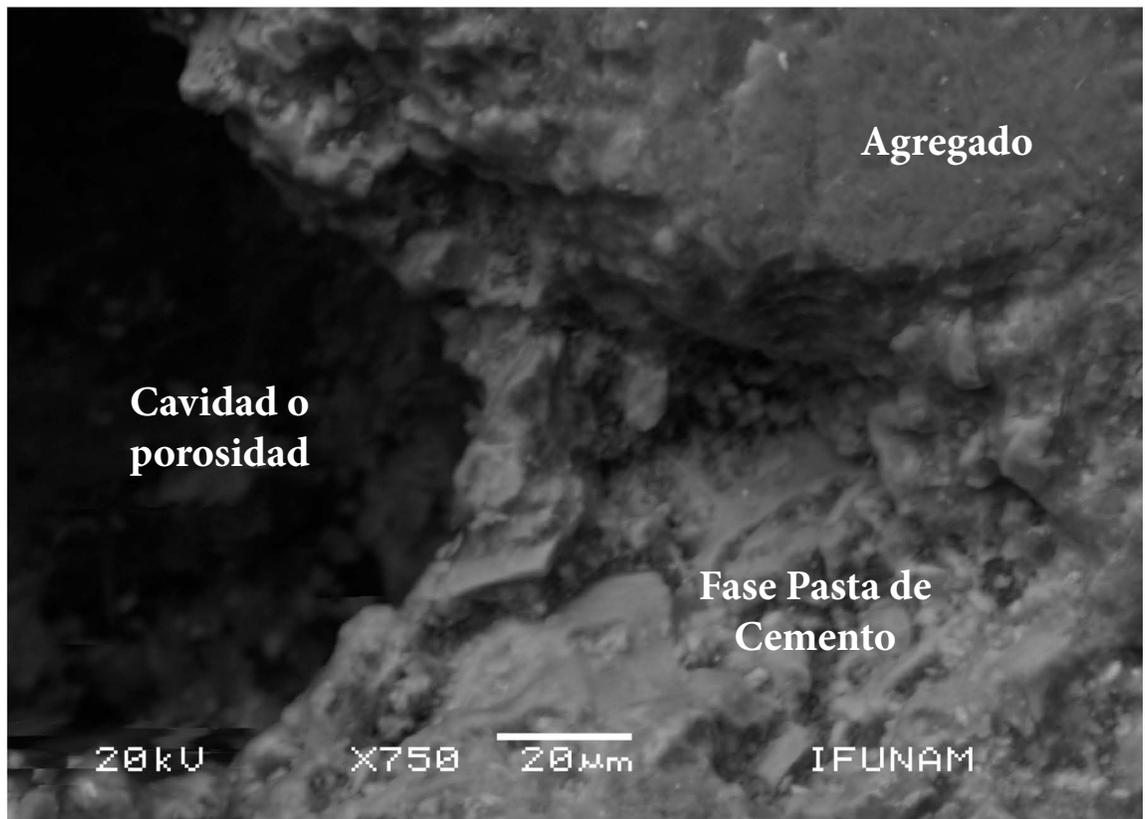


▲ **Figura No. 39-A.-** Imágen de Microscopia Electrónica de Barrido a 65 ampliaciones mediante rayos dispersados a bajo vacío en la Zona 2-A tomadas en la muestra de Mortero con aditivo PMF a los 28 días de endurecimiento, donde se observa las tres fases principales del mortero, fase pasta de cemento, fase de agregados y la ITZ, así como la matriz cementante.

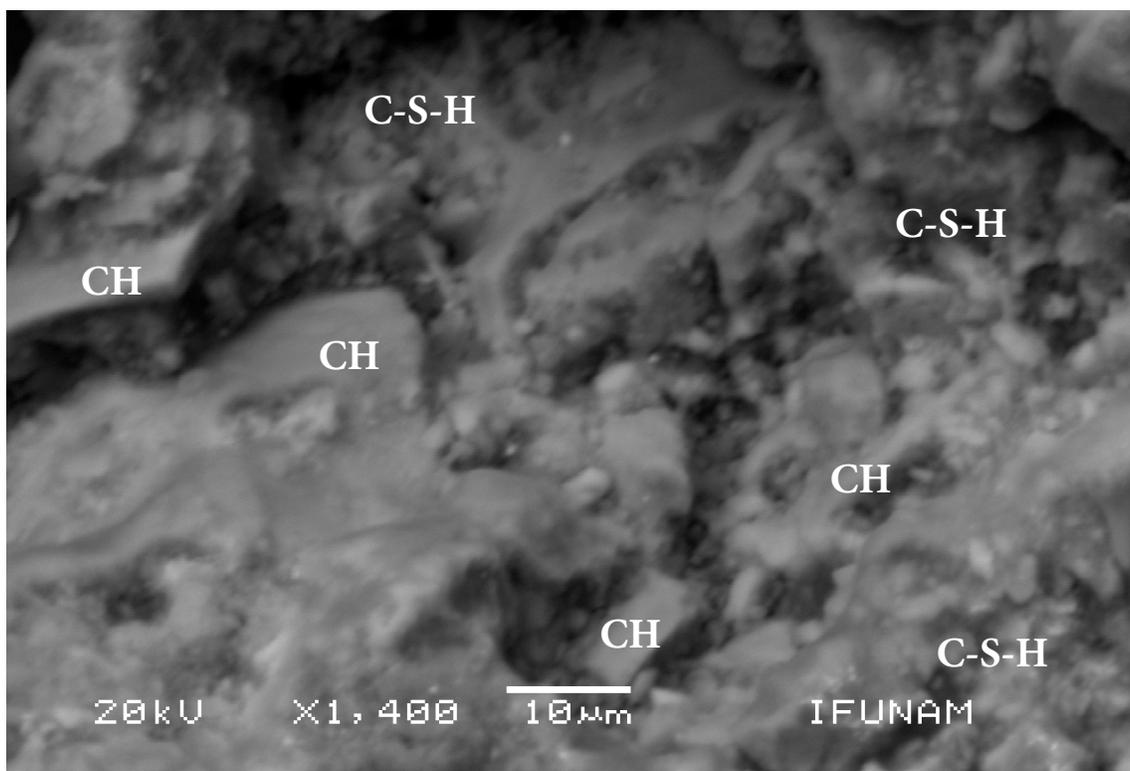




▲ **Figura No. 39-B.-** Imágen de Microscopia Electrónica de Barrido a 250 ampliificaciones mediante rayos dispersados a bajo vacio en la Zona 2-A tomadas en la muestra de Mortero con aditivo PMF a los 28 días de endurecimiento, donde se observa la Morfología de la zona perteneciente a una aglomeración de cemento.



▲ **Figura No. 39-C.-** Imágen de Microscopia Electrónica de Barrido a 750 ampliificaciones mediante rayos dispersados a bajo vacio en la Zona 2-A tomada en la muestra de Mortero con aditivo PMF a los 28 días de endurecimiento, donde se puede observar un poro y la fase pasta de cemento en la matriz cementante, así como un agregado.



▲ **Figura No. 39-D.-** Imágen de Microscopia Electrónica de Barrido a 1400 ampliificaciones mediante rayos dispersados a bajo vacio en la Zona 2-A tomadas en la muestra de Mortero con aditivo PMF a los 28 días de endurecimiento, donde se empiezan a observar ya las morfologías de los productos de hidratación del cemento Portland y la interacción entre las fases que componen en Mortero.

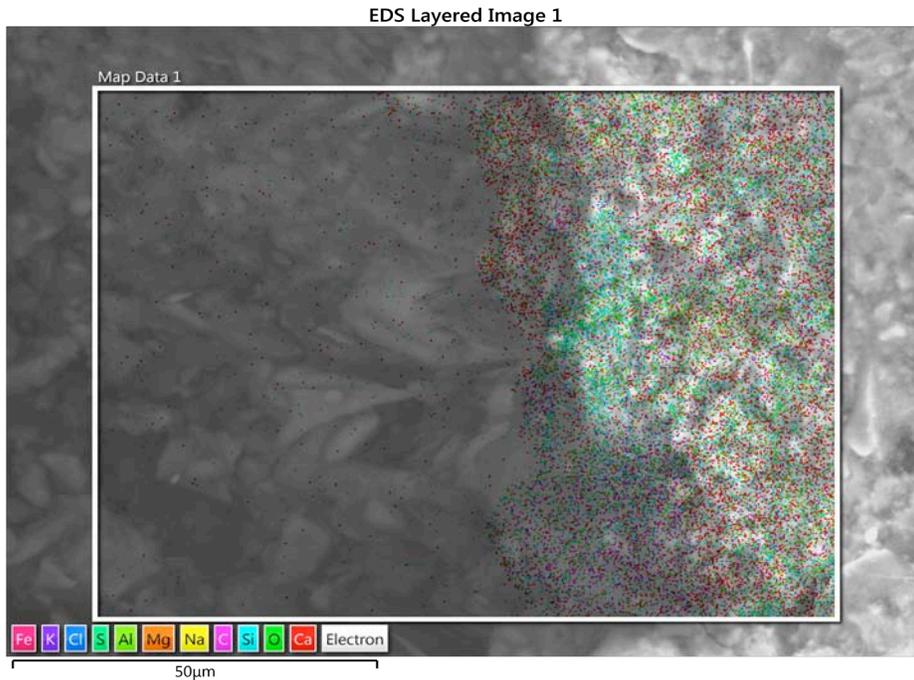
A mayor ampliación mediante el empleo de Microscopias Electrónicas de Barrido se puede hacer un análisis más detallado de la zona 2-A. En la imagen A de la Figura 39, se aprecian varios elementos interesantes de la microestructura. En primer término, junto al cumulo de pasta de Cemento y el agregado, aparecen dos pequeñas cavidades (a la izquierda y arriba a la derecha de la imagen) la cavidad de la parte posterior parece tener su origen en el desprendimiento de dos pequeños agregados durante el proceso de pulido debido a su forma irregular muy parecida a los agregados encontrados en las microscopias, mientras que la cavidad más grande debido a su forma regular es debida a la porosidad del material. Como ya mencionamos, no se ven grietas nucleadas a partir de la frontera que separa a la pasta del agregado, esto sugiere mayor fortaleza en el acoplamiento de estos dos materiales del Mortero. Además, en la superficie de la pasta de Cemento se detectan cavidades menos profundas y con menos rugosidades que las observadas en el Mortero sin aditivo (imagen B, Figura 36).

La porosidad marcada con un círculo en la Imagen 39-A nos permitió hacer un análisis detallado de la zona de contacto entre esos agregados y la matriz cementante (ver la Figura 15 del capítulo 2 y la 30 y 31 del capítulo 4). En la imagen C de la Figura 39 aparece a mayor amplificación la cavidad marcada en la imagen A de la misma Figura. Al ampliar el borde de esta zona hasta 1400 aumentos (Imagen D, Figura 39), claramente se detectan objetos con morfologías similares a las fases de hidratación CH (véase a Metha⁹⁶) y C-S-H (véase a Liu et al.¹⁰¹).

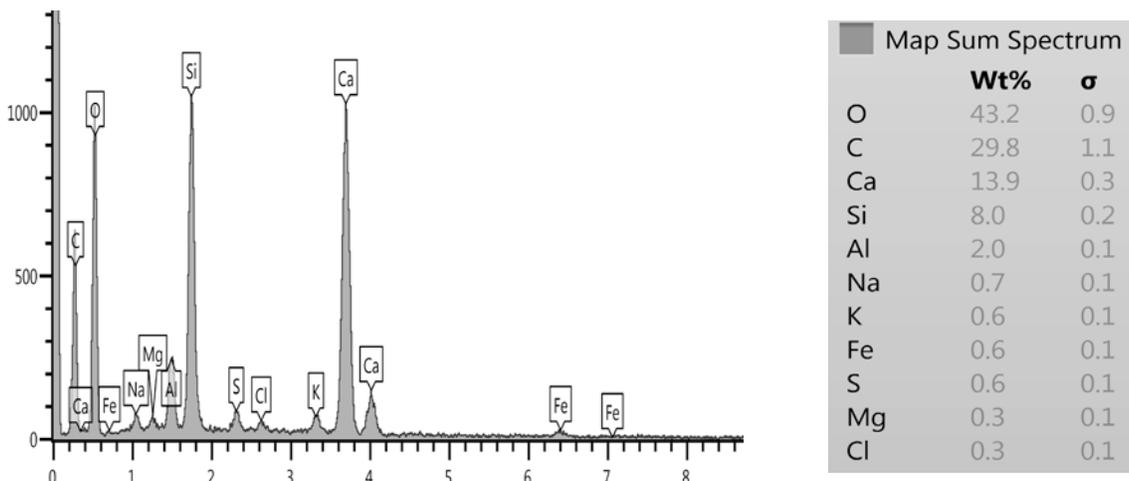
En este caso –Morteros elaborados con Aditivo de PMF-, también hicimos un análisis por Espectrometría de Dispersión de Energías (EDS) de la muestra. La zona de análisis fue el borde de una porosidad en la muestra (imagen C de la Figura 39). En la Figura 40-A y 40-B, aparecen registrados los resultados del análisis, a partir de estos, se encuentra que la relación Ca/Si es del orden de 1.73. De acuerdo a varios autores esto indicaría la presencia de fases de CH y C-S-H. Por ejemplo, Taylor⁹¹ establece que si la relación C/S es menor de 1.5 tendremos C-S-H tipo uno y si es mayor a 1.5 se trata de C-S-H tipo 2, a su vez Rayment indica que se obtiene una fase C-S-H si la relación C/S se encuentra entre 1.75 a 1.85, por su parte Metha⁹² refiere que el intervalo de la relación C/S varía entre 1.5 y 2. Por lo tanto el efecto de las partículas sub-micrométricas de minerales de Fósforo (PMF), favorece la formación de fases hidratadas que se dispersan de manera uniforme sobre la superficie de los agregados pétreos y en la zona de transición, favoreciendo con esto un acoplamiento más robusto entre los agregados y el material cementante, lo que a su vez, genera un mejor desempeño mecánico del Mortero.

91 Taylor, H.F.W. (1997). Cement chemistry. 2da Edición. London: Thomas Telford.

92 Mehta, P. K. (2006). Microstructure, Properties and Materials. 3ra Edición. McGraw-Hill.



▲ **Figura No. 40-A.-** Espectrometría de Dispersión de Energía (EDS) en la zona de la cavidad (imagen C Figura 39).



▲ **Figura No. 40-B.-** Espectrometría de Dispersión de Energía (EDS) en la zona de la cavidad (imagen C Figura 39)

En resumen, los resultados y análisis hechos mediante microscopía óptica y microscopías electrónicas de barrido así como las pruebas de resistencia a la compresión, parecen indicar que la adición de partículas sub micrométricas de minerales de Fósforo (PMF) en las mezclas de Mortero favorecen una distribución más homogénea de la fase pasta de cemento sobre la estructura del material, esto si suponemos que las partículas sub micrométricas funcionan como un activador para promover el proceso de hidratación



principalmente de la fase del gel C-S-H responsable de la consolidación y resistencia mecánica de la mezcla.

Discusión de resultados

Los resultados que presentamos en el apartado anterior y la consulta sistemática de bibliografía relacionada con el campo de la nanotecnología aplicada a la modificación de materiales basados en Cemento para a la industria de la construcción nos llevan a plantear algunas hipótesis y a establecer comparaciones relacionadas con el efecto que tiene en el desempeño mecánico de los Morteros la adición de partículas sub-micrométricas de minerales de Fósforo (PMF).

En años recientes, los desarrollos en el campo de la nanotecnología aplicada a la modificación de materiales basados en Cemento para la industria de la construcción, ha demostrando que se pueden perfeccionar las practicas constructivas. Mejoras notables se han logrado en la resistencias mecánica del concreto así como en su durabilidad, haciendo más sustentable los procesos constructivos a partir del empleo de nano-partículas de diferente naturaleza (nanotubos de carbón, nano-partículas de arcillas y de otros minerales), así como recubrimientos anticorrosivos respetuosos con el medio ambiente, utilizando técnicas de nano-encapsulación.⁹³

Las partículas nano-métricas que se emplean en estos procedimientos se pueden clasificar en dos grupos: Las nano partículas de cerámicas inertes y las nano partículas de cerámicas activas, las primeras solo tienen la función de rellenar las cavidades que se forman durante el fraguado de la pasta de Cemento, mientras que las segundas, influyen en el proceso de hidratación y/o en el desarrollo de la microestructura de la pasta, es decir presentan una actividad catalítica, ambas actividades influyen en la resistencia mecánica de la pasta de Cemento. A este procedimiento de modificación de pastas de Cemento, se le conoce también como “Siembra de nano-partículas de cerámicas activas”⁹⁴

93 Hanus, M. J. y Harris, A. T. (2013). Nanotechnology innovations for the construction industry. *Progress in Materials Science*. Vol 58. Paginas 1056–1102.

94 Muciño, V. A. y Orozco E. (2016). Adición de nano-partículas de minerales para el endurecimiento de cemento tipo Portland. *Revista Academia*. Vol. 14. Pag. 13-23.

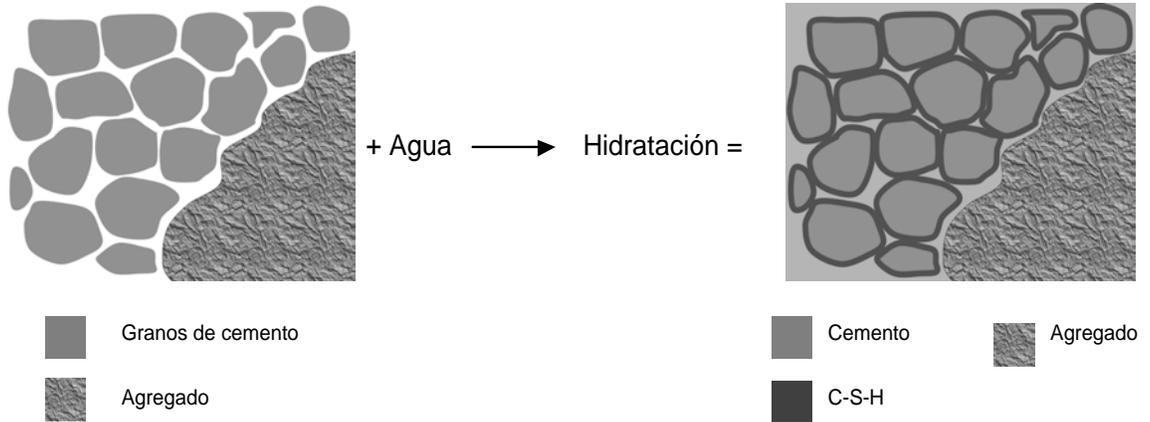
Nuestro procedimiento, correspondería al caso de “Siembra de nano-partículas cerámicas activas”, ya que:

- a) A las mezclas de Mortero se les adicionó (sembró) el 1% de partículas sub-micrométricas de minerales de Fósforo, con respecto al peso del Cemento.
- b) La resistencia mecánica a la compresión del Mortero con partículas sub-micrométricas se incrementó en un 16% con respecto a la del Mortero de referencia.
- c) Los análisis de microscopia tanto óptica como electrónica de barrido mostraron un tamaño más pequeño de partículas de pasta de Cemento, es decir, la velocidad de reacción del Cemento se incrementó y fue uniforme y, adicionalmente, se observó una distribución más homogénea de las fases hidratadas en el Mortero con partículas sub-micrométricas.

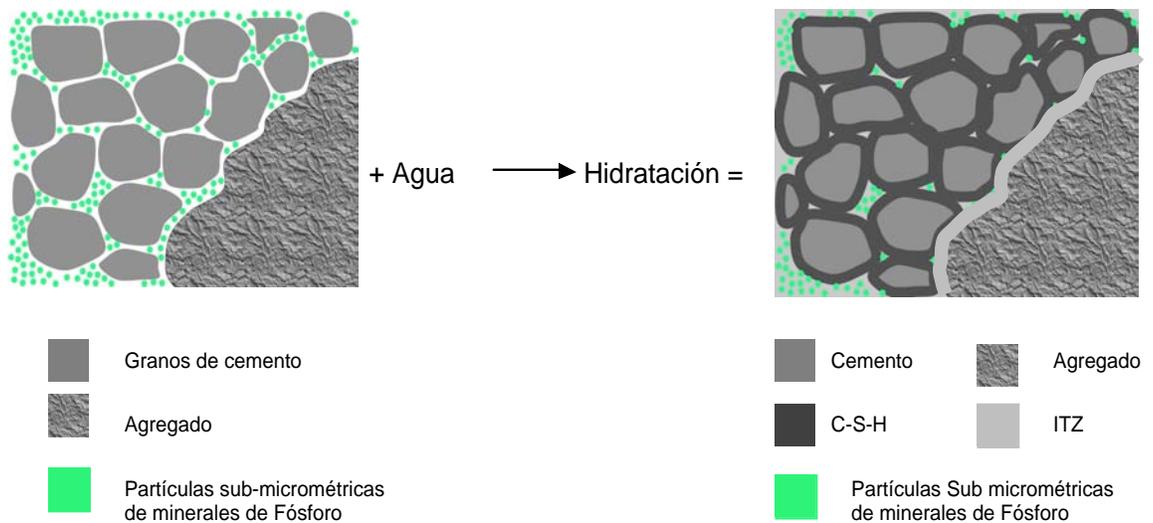
Esquemáticamente podemos ilustrar el efecto de la siembra de partículas sub-micrométricas PMF en Morteros de acuerdo al diagrama que aparece en la Figura 41. Como podemos observar en ese diagrama, la siembra de partículas sub micrométricas genera un relleno a una escala micro y nano debido al proceso químico de hidratación de las PMF. Esto provoca que las partículas de Cemento reaccionen más rápidamente de tal forma que al final resultan de menor tamaño que las del Mortero Tradicional -de referencia, arriba del diagrama-. Las partículas sub-micrométricas que se alojan cerca de la superficie de los agregados, generan una estructura homogénea en la ITZ que inhibe la formación de grietas que debiliten la resistencia del Mortero.



Mezcla de Mortero Tradicional



Mezcla de mortero micro y nano estructurado.



▲ **Figura No.41.-** Diagrama esquemático del proceso de Siembra de Partículas sub-micrométricas de

PMF en mezclas de Morteros.

Podemos contrastar esta descripción con algunos trabajos reportados en la literatura:

1. La Siembra de partículas micro y nano-métricas disminuyen el tamaño de poros entre las partículas de Cemento y los agregados en la mezcla endurecida, reduciéndose también el efecto de micro agrietamiento, efecto reportado por Li et al. (2004)⁹⁵ en su estudio titulado “*Un estudio sobre las propiedades mecánicas y sensibles a la presión de mortero de cemento con materiales de fase nano*” donde se concluye que a menor micro

⁹⁵ Li, Hui. et al. (2004). A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. Cement and Concrete Research. Vol. 34. Pag. 435–438.

agrietamiento se incrementa la resistencia a la compresión, además Aqel (2016)⁹⁶, sostiene que las nano partículas utilizadas como filler (*que no es nuestro caso*) llenan los huecos entre partículas grandes de cemento y por lo tanto aumentan la densidad y reducen el total de volumen de poros del sistema

2. Las partículas de minerales de Fósforo sembradas, sirven como catalizadores favoreciendo el desarrollo de fases de hidratación en el cemento. Esto se debe a que en general, como lo establece Brown (1999)⁹⁷: “*El Comportamiento de la hidratación de los fosfatos de calcio es análogo al comportamiento de la hidratación de los silicatos de calcio*”.

3.- El incremento de la fase de Silicato de Calcio Hidratado (C-S-H) y su distribución homogénea en la mezcla del Mortero, aumenta su resistencia a la fractura, esto lo reporta Singh, L.P. et. al. (2013)⁹⁸ en un estudio acerca del *rol benéfico de la siembra de nano-sílice en materiales a base de Cemento*.

La acción benéfica de la presencia de nano-partículas en la microestructura de los materiales a base de Cemento podemos resumirla como sigue^{99, 100} :

- Una buena dispersión de las nano-partículas aumenta la viscosidad de la fase líquida, ayudando a suspender los granos de cemento y agregados, inhibiendo la segregación de partículas y mejorando con esto la maleabilidad de la mezcla.

- Las Nano-partículas llenan los huecos entre los granos de cemento, lo que resulta en la inmovilización de agua “libre” (el efecto “relleno”).

- Las nano-partículas bien dispersas funcionan como centros de nucleación que aceleran el proceso de hidratación de la pasta de Cemento.

- Las nano-partículas favorecen la formación de cristales de tamaños pequeños de hidróxido de calcio, sulfatos de aluminio y favorece la polimerización de las moléculas

96 Aqel, M. y Panesar, D. (2016). Hydration kinetics and compressive strength of steam cured cement pastes and mortars containing limestone filler. *Construction and Building Materials* 113 (2016) 359–368

97 Brown, P.W. (1999). Hydration behavior of calcium phosphates is analogous to hydration behaviour of calcium silicates. *Cement and Concrete Research*. Vol. (29). Pag. 1167-1171.

98 L.P. et. al. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. *Construction and Building Materials* 47 1069–1077

99 Sobolev, K., y Ferrada-Gutiérrez, M. (2005). How nanotechnology can change the concrete world: Part 1. *American Ceramic Society Bulletin*, 10, Pag. 14–17.

100 Sanchez, F., y Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 24 (11), Pag. 2060–2071.

del gel C-S-H.

- Las nano-partículas mejoran la estructura de la zona de contacto de los agregados, lo que resulta en una unión mas robusta entre los agregados y la pasta de cemento.

- Las nano partículas retrasan agrietamientos y efectos entrelazados entre los planos de deslizamiento mejorando la tenacidad, el esfuerzo cortante, el esfuerzo a la tracción y la resistencia a la flexión de materiales a base de Cemento.

Es así que al termino de esta investigación podemos aseverar que el uso de nano materiales como lo son las Partículas de Minerales de Fòsforo (PMF) de origen natural pueden incrementan la resistencia a la compresión en las estructuras de concreto como lo hace con los Morteros evaluados en este estudio debido a su naturaleza –Materiales cerámicos compuestos por los mismos elementos- y que por ende disminuye el contenido de cemento en una obra de construcción, como lo muestra el siguiente ejemplo donde se diseñó una sección cuadrada de una columna de concreto reforzado así como el área de acero necesario para una carga critica de diseño (Pu) de 250 toneladas y un Momento de 40 Ton-m, tomándose en cuenta las siguientes características y especificaciones técnicas;

El refuerzo longitudinal se ubicara en las 4 caras de la columna.

El refuerzo transversal estará constituido por estribos que cumplan lo estipulado en las NTCDF en su apartado 6.2.3.2

Utilizar concreto clase 1 con una resistencia a la compresión f_c de 250 kgs/cm²

Utilizar concreto clase 1 con Aditivo PMF amentado su resistencia a la compresión f_c un 16% es decir 290 kgs/cm²

	Concreto simple Clase 1	Concreto simple Clase 1 + PMF
Especificaciones técnicas		
Resistencia a la compresión (f_c)	250 kg/cm ²	290 kg/cm ²
Fluencia del acero (f_y)	4200 kg/cm ²	4200 kg/cm ²
Carga critica de diseño (Pu)	250 Ton	250 Ton
Momento ultimo de diseño (Mu)	40 Ton – m	40 Ton – m
Constantes		
Valor nominal a compresión	$f^*_c = 0.8 f_c = 0.8 * 250 = 200 \text{ kg/cm}^2$	$f^*_c = 0.8 f_c = 0.8 * 290 = 232 \text{ kg/cm}^2$
Como $f^*_c \leq 250 \text{ kg/cm}^2$	$f^{**}_c = 0.85 f^*_c = 0.85 * 200 = 170 \text{ kg/cm}^2$	$f^{**}_c = 0.85 f^*_c = 0.85 * 232 = 197 \text{ kg/cm}^2$
Excentricidad	$e = Mu/Pu = 40/250 = 0.16$	$e = Mu/Pu = 40/250 = 0.16$
Núcleo no confinado	$F_r = 0.7$	$F_r = 0.7$

Diseño de columna con concreto sin aditivo.

Estimación preliminar suponiendo que solo actúa P_u y $P = 0$

Columna de concreto con refuerzo longitudinal y recubrimiento

$$P_u = 0.80 f'_c A_g + A_s f_y$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$250000 \text{ Ton-m} = 0.80 \times 170 \text{ Kgs/cm}^2 \times A_g + 0$$

$$A_g = h \cdot b; \quad h = b; \quad A_g = b^2$$

$$250000 \text{ Ton-m} = 0.80 \cdot 170 \text{ Kgs/cm}^2 \cdot b^2$$

Despejando a b obtenemos:

$$b^2 = \sqrt{(P_u / (0.80 \times f'_c))} = \sqrt{(250000 / (0.80 \cdot 170))} = 42.87 \text{ cms}$$

$$b = 42.87 \text{ cms} = 45 \text{ cms.}$$

Sección de la columna de 45 centímetros x 45 centímetros de lado.

Determinación del acero de refuerzo longitudinal

Proponiendo un revestimiento (d) de 2.5 centímetros tenemos:

De la figura No. 42 tenemos:

$$d/h = 0.40/0.45 = 0.88 = 0.9$$

$$e/h = 0.16/0.45 = 0.36$$

$$K = P_u / (F_R b h f'_c) = 250000 / (0.7 \cdot 45 \cdot 45 \cdot 170) = 1.03$$

$$q = 1.2$$

$$q = \rho f_y / (f'_c) \quad \rho = 1.2 \times 170 / 4200 = 0.048$$

$$\rho = A_s / (bh) \quad A_s = \rho b d = 0.048 \times 45 \times 40 = 86.4 \text{ cm}^2$$

Utilizando varillas del No. 12 tenemos

$$86.4 / 11.4 = 7.57 \text{ varillas} = 8 \text{ varillas}$$



Determinación del acero de refuerzo transversal

Según el criterio de las NTC 6.2.3.2 Todas las barras o paquetes de barras longitudinales deben restringirse contra el pandeo con estribos o zunchos con separación no mayor que:

Separación de los estribos considerando varilla del No. 3

$$a) 850d / \sqrt{f_y} = (850 \cdot 3.81) / \sqrt{4200} = 49.9 \text{ cms}$$

$$b) 48d = 48 \cdot 3.81 = 182.8 \text{ cms}$$

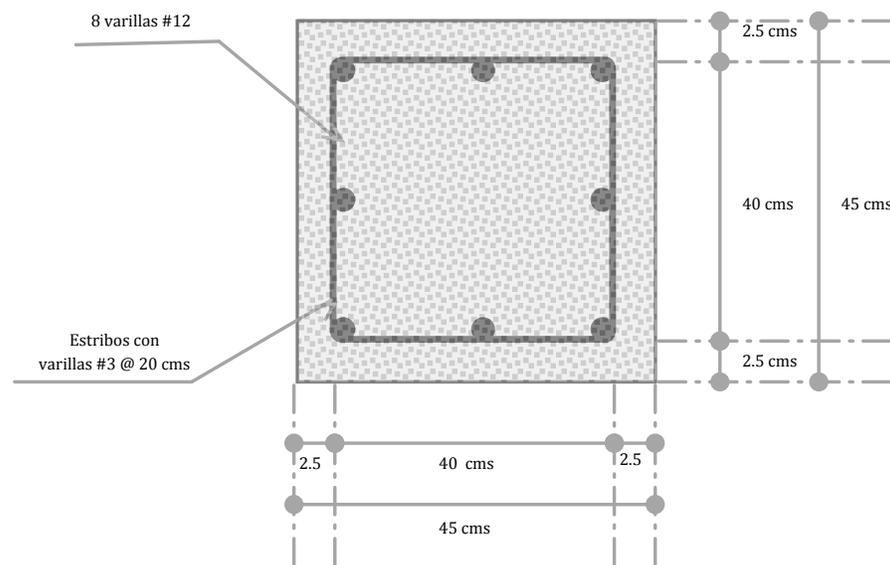
$$c) b/2 = 45/2 = 22.5$$

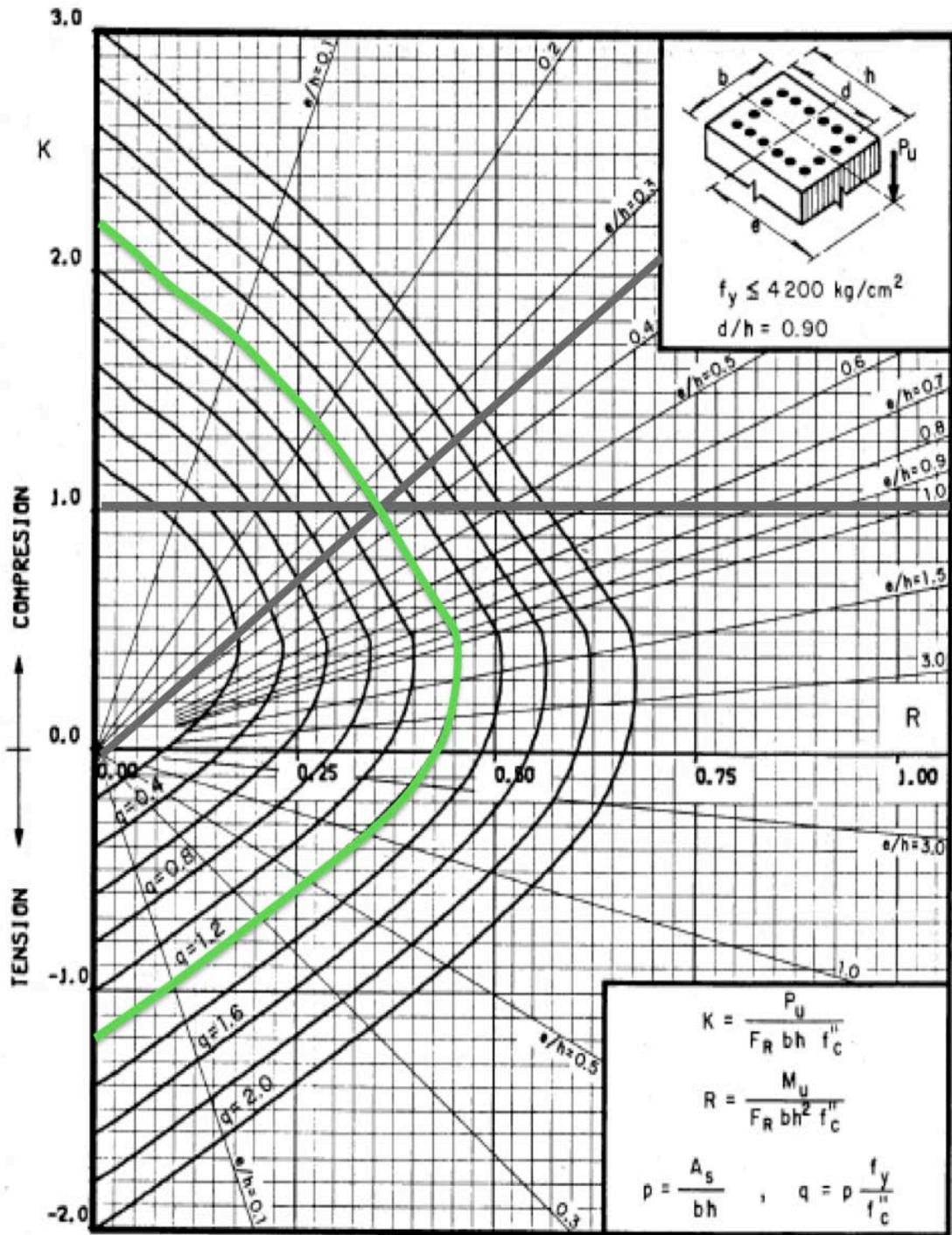
Rige la separación de 20 cms.

Sección adoptada

Columna de concreto armado de 0.45 x 0.45 metros de lado, colada con concreto clase 1 de resistencia a la compresión $f_c = 250 \text{ kgs/cm}^2$ a los 28 días, refuerzo longitudinal conformado por 8 varillas del No. 12 en las cuatro caras de la estructura y refuerzo transversal elaborado con varillas del No. 3 @ 20 centímetros.

DISEÑO DE COLUMNA CON CONCRETO CLASE 1 (250 Kgs/cm²) SIN ADITIVO





A_s = Area total de refuerzo
 $f'_c = 0.85 f_c^*$, si $f_c^* \leq 280 \text{ kg/cm}^2$; $f'_c = (1.05 - \frac{f_c^*}{1400}) f_c^*$, si $f_c^* > 280 \text{ kg/cm}^2$
 F_R = Factor de reducción de resistencia
 P_U = Carga axial última
 M_U = Momento flexionante último

▲ **Figura No.42-A.-** Gráfica utilizada en el ejemplo para diseño plástico de columnas de concreto

reforzado.

Diseño de columna con concreto y aditivo PMF.

Estimación preliminar suponiendo que solo actúa P_u y $P = 0$

Columna de concreto con refuerzo longitudinal y recubrimiento

$$P_u = 0.80 f'_c A_g + A_s f_y$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$250000 \text{ Ton-m} = 0.80 \times 197 \text{ Kgs/cm}^2 \times A_g + 0$$

$$A_g = h \cdot b; \quad h = b; \quad A_g = b^2$$

$$250000 \text{ Ton-m} = 0.80 \cdot 197 \text{ Kgs/cm}^2 \cdot b^2$$

Despejando a b obtenemos:

$$b^2 = \sqrt{(P_u / (0.80 \times f'_c))} = \sqrt{(250000 / (0.80 \cdot 197))} = 39.82 \text{ cms}$$

$$b = 39.82 \text{ cms} = 40 \text{ cms.}$$

Sección de la columna de 40 centímetros x 40 centímetros de lado.

Determinación del acero de refuerzo longitudinal

Proponiendo un revestimiento (d) de 2.5 centímetros tenemos:

De la figura No. 42 tenemos:

$$d/h = 0.35/0.40 = 0.875 = 0.9$$

$$e/h = 0.16/0.40 = 0.4$$

$$K = P_u / (F_R b h f'_c) = 250000 / (0.7 \cdot 40 \cdot 40 \cdot 197) = 1.13$$

$$q = 1.6$$

$$q = \rho f_y / (f'_c) \quad \rho = 1.6 \times 197 / 4200 = 0.075$$

$$\rho = A_s / (bh) \quad A_s = \rho b d = 0.075 \times 35 \times 40 = 105 \text{ cm}^2$$

Utilizando varillas del No. 12 tenemos

$$105 / 11.4 = 9.21 \text{ varillas} = 10 \text{ varillas}$$

Determinación del acero de refuerzo transversal

Según el criterio de las NTC 6.2.3.2 Todas las barras o paquetes de barras longitudinales deben restringirse contra el pandeo con estribos o zunchos con separación no mayor que:

Separación de los estribos considerando varilla del No. 3

$$a) 850d / \sqrt{f_y} = (850 \cdot 3.81) / \sqrt{4200} = 49.9 \text{ cms}$$

$$b) 48d = 48 \cdot 3.81 = 182.8 \text{ cms}$$

$$c) b/2 = 45/2 = 22.5$$

Rige la separación de 20 cms.

Sección adoptada

Columna de concreto armado de 0.40 x 0.40 metros de lado, colada con concreto clase 1 adicionado con PMF de resistencia a la compresión $f_c = 290 \text{ kgs/cm}^2$ a los 28 días, refuerzo longitudinal conformado por 10 varillas del No. 12 en las cuatro caras de la estructura y refuerzo transversal elaborado con varillas del No. 3 @ 20 centímetros.

DISEÑO DE COLUMNA CON CONCRETO Y ADITIVO (INCREMENTO 16% f_c)

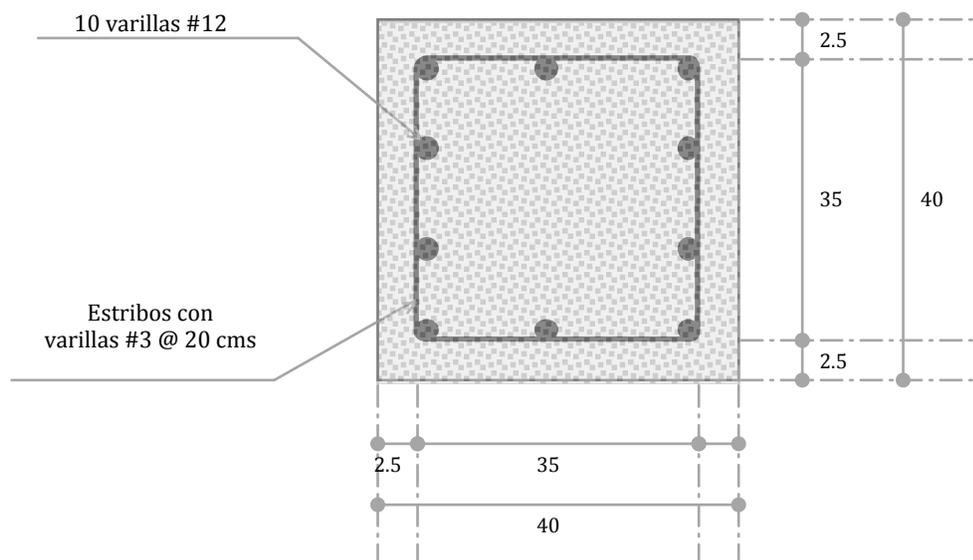
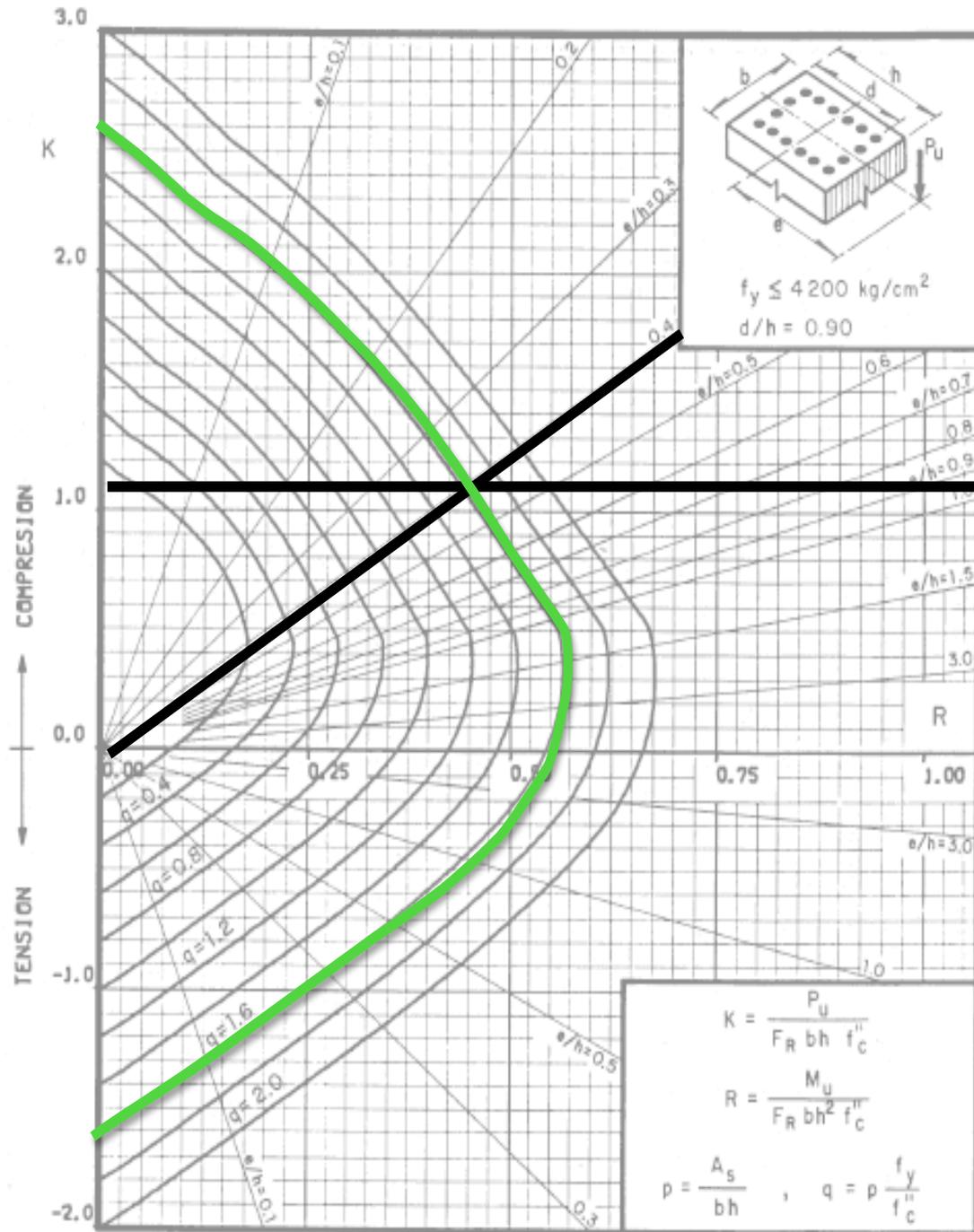


Figura A2

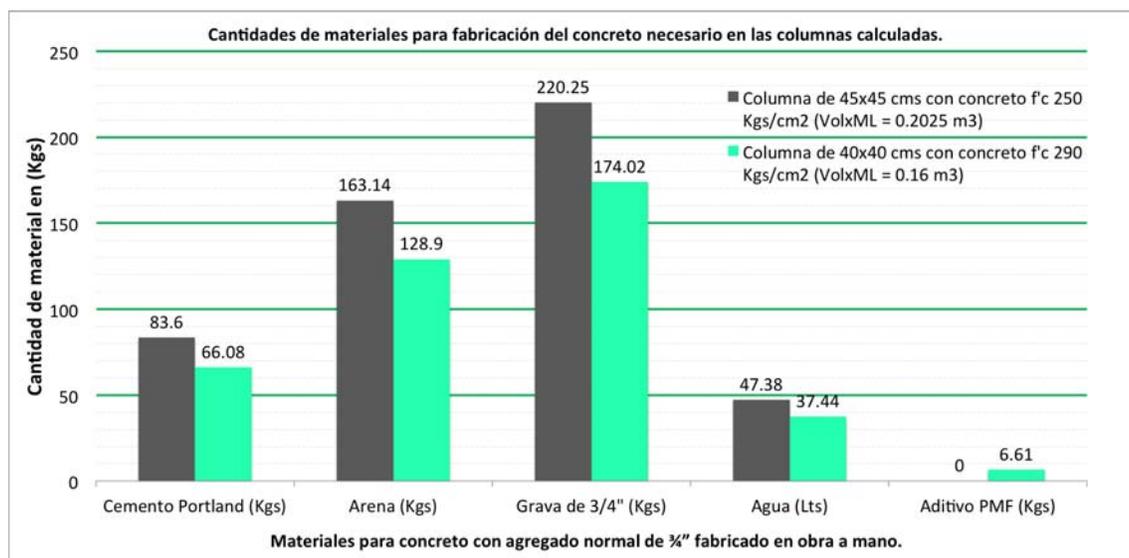


A_s = Área total de refuerzo
 $f_c'' = 0.85 f_c^*$, si $f_c^* \leq 280 \text{ kg/cm}^2$; $f_c'' = (1.05 - \frac{f_c^*}{1400}) f_c^*$, si $f_c^* > 280 \text{ kg/cm}^2$
 F_R = Factor de reducción de resistencia
 P_U = Carga axial última
 M_U = Momento flexionante último

▲ **Figura No.42-A.-** Gráfica utilizada en el ejemplo para diseño plástico de columnas de concreto reforzado

Como podemos observar el diseño para la columna con concreto de resistencia a la compresión de 250 Kgs/cm² genera una sección de 45 x 45 cms, al añadir el aditivo la resistencia a la compresión aumenta en un 16% (290 kgs/cm²) lo cual afecta en las secciones calculadas con una reducción de 5 cms por lado, aunque también aumenta el acero transversal.

No obstante podemos ver la repercusión que tiene esta disminución de secciones en las cantidades para la fabricación de concreto por metro lineal de columna.



▲ **Figura No.43.-** Grafica donde se muestran las cantidades de materiales necesarios para fabricar la columna en estudio con concreto sin aditivo y con el uso de PMF¹⁰¹.

De acuerdo a la grafica de la Figura 36 para fabricar un metro lineal de columna utilizando el concreto sin aditivo las secciones son de 45x45 cms, requiriéndose 83 Kg de cemento, 163 Kg de Arena, 220 Kgs de grava y 47 Lts de agua, estas cantidades se ven disminuidas en un más de un 20% al aumentar la resistencia a la compresión en un 16% utilizando aditivo PMF y reduciendo la sección de la columna.

¹⁰¹ Las cantidades necesarias para elaborar un metro cubico de concreto fueron obtenidas del Libro Costos de edificación del grupo BIMSA CMDG, tomo 258.



4.2 Conclusiones

Al termino del siguiente trabajo de investigación y bajo las discreciones establecidas podemos concluir lo siguiente;

1. La adición de partículas sub micrométricas de minerales de Fósforo (PMF); 1% en peso respecto al Cemento Portland Ordinario, en mezclas de Mortero elaboradas con agua potable de la red, incrementa su resistencia mecánica a la compresión hasta en un 16% con respecto a la mezcla de Mortero sin aditivos.

2. El análisis mediante microscopia óptica y electrónica de barrido de la microestructura de las mezclas de Mortero preparadas con partículas sub micrométricas de minerales de Fósforo, muestra que se obtiene una distribución más homogénea de la fase aglomerante de Cemento en las mezclas de Mortero.

3. Los resultados experimentales anteriores sugieren que es muy probable que el aditivo “sembrado” como partículas sub-micrométricas en las mezclas de Mortero, produce un efecto catalizador que favorece el crecimiento rápido de las fases hidratadas de silicatos lo que a su vez genera una estructura homogénea que llena cavidades e inhibe el crecimiento de micro-grietas y en consecuencia incrementa el desempeño mecánico del Mortero.

4. El empleo de minerales de Fósforo naturales, hace económicamente competitivo el procedimiento para obtener mezclas de Mortero con mayor resistencia mecánica a la compresión. Sin embargo se necesita experimentar con un método de molienda mas barato que haga competitivo el proceso.

5. El empleo de este tipo de aditivos, hace ecológicamente viable el uso de los Morteros, ya que, en principio, favorece el empleo de menos cantidades de Cemento para fabricarlos.

6. Las pruebas de resistencia a la compresión en el intervalo de 7 a 28 días indican que a partir de los 14 días el Mortero alcanza su resistencia máxima, lo que es importante para los tiempos de construcción y descimbrado.

7. Los Morteros fabricados por este procedimiento pueden tener una aplicación inmediata para fabricar elementos de construcción como tabiques, coladeras, postes de luz, adoquines, elementos decorativos como celosías etc.

8. La tecnología del Mortero es muy escasa a nivel internacional generando un amplia gamma de investigación que podría obtener beneficios en la tecnología del concreto y principalmente en el sector de la construcción, arquitectura e ingeniería. Es claro que la experiencia obtenida en esta tesis para el caso de los Morteros puede extenderse al caso de los concretos.

9. La experiencia adquirida en investigaciones multidisciplinarias como son por un lado la Ciencia e Ingeniería de Materiales y por otro La Arquitectura, confirma que es necesario crear vínculos entre diferentes especialistas para generar nuevos conocimientos y soluciones adecuadas para problemas específicos asociados a los métodos constructivos.

Recomendaciones

1. Utilizar diferentes tipos y marcas comerciales de cementos y agregados para ver su influencia en las propiedades mecánicas.

2. Cambiar las condiciones de curado y fraguado a las utilizadas en esta tesis.

3. Desarrollar un proceso de reproducción del aditivo natural industrializado, el cual genere el tamaño de partículas utilizadas en esta investigación a un menor costo, adecuado a la industria cementera, de la construcción y finalmente a la economía del país.

4. Generar una análisis cuantitativo del presente estudio, mediante valoración de Rayos X, por el método de Rietveld, entre otros, analizando las fases de hidratación en diferentes edades de endurecimiento.

5. Estudiar las características físicas principales del Mortero como lo son fluidez, revenimiento, consistencia, retención de agua, adherencia, contenido de aire.

6. Utilizar el aditivo empleado en esta tesis en mezclas de concreto y analizar su comportamiento en ese tipo de material.

7. Estudiar y Analizar los materiales o materias primas con las que se generan las

mezclas de Mortero, debido a que dependiendo del tipo y marca comercial de cemento, agregados y agua utilizados en la elaboración de las mezclas de Mortero, las resistencias a la compresión varían significativamente.

8. Estudiar y analizar los más de 32 tipos y marcas comerciales de cemento, así como también, los agregados y el tipo de agua utilizados en las mezclas de concreto y Mortero ya que tienen características físicas y químicas que cambian significativamente de un estado de la republica a otro, perjudicando principalmente las particularidades mecánicas de estos materiales. Aunado a esto, el factor climático y las condiciones necesarias de trabajo de cada obra ingenieril o arquitectónica, hacen de la necesidad de una base de datos que conste principalmente de estudios de mercado, estudios físicos, químicos, biológicos y mecánicos de cada uno de los elementos que son utilizados y que constituyen las mezclas de Mortero y concreto, con el fin de hacer diseños de mezclas más rápidos y económicos que cumplan con los requisitos y estándares de calidad y confiabilidad.

REFERENCIAS



LIBROS.

- [1] ACI 214R-11. (2011). *Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete*. 1ra edicion. American Concrete Institute.
- [2] Aïtcin, P. y Mindess, S. (2011). *Sustainability of Concrete*. 1ra Edicion. Spon Press.
- [3] Andrade, C. y Gulikers. J. (2010). *Advances in Modeling Concrete Service Life*. RILEM.
- [4] Bapat, J. D. (2012). *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*. 1ra Edicion. Estados Unidos: Taylor & Francis Group, LLC.
- [5] Ben-Nissan, B. (2014). *Advances in Calcium Phosphate Biomaterials*. 2da edición. New York: Springer Science+Business Media.
- [6] Bensted, J. y Barnes, P. (2002). *Structure and Performance of Cements*. 2da Edicion. London and New York: Spon Press.
- [7] Bensted, J. y London, P.B. (2008). *Structure and Performance of Cements*. 2da Edición. Spon Press.
- [8] Campbell, H. D. (1999). *Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker*. 2da edición. USA: Portland Cement Association.
- [9] Donald, H. C. (1999). *Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker*. 2da Edicion. Portland Cement Association.
- [10] Duran, J. (2000). *Sands, Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials*. 1ra Edicion. New York: Springer Science+Business Media New York.
- [11] GAJANAN, M.S. (2012). *GREEN BUILDING WITH CONCRETE*; Sustainable Design and Construction. CRC Press Taylor & Francis Group.
- [12] Hewlett, P. (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4ta edición. Elsevier Science & Technology Books.
- [13] Kosmatka, H.S. et al. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de concreto*. 1ra edición. Illinois, EE.UU: Portland Cement Association.
- [14] Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*. 1ra Edicion. New York London: Springer Science+Business Media.
- [15] Li, Z. (2011). *Advanced Concrete Technology*. 1ra Edicion. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.

- [16] Maekawa, K. et al. (2009). *Modelling of Concrete Performance; Hydration, microstructure formation and mass transport*. 2da edición. London and New York: Taylor & Francis e Library.
- [17] Maso, J.C. (1996). *Interfacial Transition Zone in Concrete*. 1ra edición. LMDC, Toulouse, France.
- [18] Neville, A. (2006). *Concrete; Neville's Insights and Issues*. 1ra Edición. London: Thomas Telford Publishing.
- [19] Newman, J. y Choo. B.S. (2003). *Advanced Concrete Technology; Constituent Materials*. 1ra Edición. Elsevier Ltd.
- [20] Ochshorn, J. (2010). *Structural Elements for Architects and Builders; Design of Columns, Beams and Tension Elements in Wood, Steel and Reinforced Concrete*. 1ra Edición. Oxford: Elsevier.
- [21] Quiroga, P. y Fowler, W. D. (2003). *The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete*. 1ra edición. University of Texas at Austin: International Center for Aggregates Research Aggregates Foundation for Technology, Research, and Education.
- [22] Ramachandran, V. S. Y Beaudoin, J. J. (2001). *HANDBOOK OF ANALYTICAL TECHNIQUES IN CONCRETE SCIENCE AND TECHNOLOGY; Principles, Techniques, and Applications*. William Andrew Publishing.
- [23] Ramezani pour, A.A. (2014). *Cement Replacement Materials; Properties, Durability, Sustainability*. 1ra Edición. New York: Springer Geochemistry/Mineralogy.
- [24] Sabnis. G. M. (2012). *GREEN BUILDING WITH CONCRETE; Sustainable Design and Construction*. Taylor & Francis Group, LLC.
- [25] Sakai, K. (2010). *Integrated Design and Environmental Issues in Concrete Technology*. 2da Edición. Taylor & Francis.
- [26] Scrivener, K. et al. (2016). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. 1ra Edición. CRC Press Taylor & Francis Group.
- [27] Siddique, R. y Khan, M. I. (2011). *Supplementary Cementing Materials*. 1ra Edición. London-New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [28] Sobolev, K. y Shah, S.P. (2015). *Nanotechnology in Construction*. 1ra edición. New Seitzerlandi: Springer Publishing.
- [29] Soroka, I. (1997). *Portland Cement Paste and Concrete*. 1ra edición. THE MACMILLAN PRESS LTD.

- [30] Taylor, H.F.W. (1997). *Cement chemistry*. 2da Edicon. London: Thomas Telford.
- [31] Torgal, F.P. et al. (2013). *Eco-efficient concrete*. 1ra edición. New Delhi: Woodhead Publishing Limited.
- [32] Torgal, F.P. et al. (2015). *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. 1ra edición. New Seitzerlandi: Springer Publishing.
- [33] Vázquez, E. (1990). *Admixtures for Concrete; Improvement of Properties*. Barcelona: CHAPMAN AND HALL.
- [34] Wu, Ch. H. (2006). *Advanced civil infrastructure materials*. 1ra edicion. Woodhead Publishing and Maney Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining. CRC Press Boca Raton Boston New York Washington, DC.
- [35] Zijl, V. y Boshoff. W.P. (2010). *Advances in Cement Based Materials*. London: Taylor & Francis Group.

ARTICULOS.

- [1] Abmed, A.H.M. et al. (2014). *Cell Attachment Properties of Portland Cement-based Endodontic Materials: Biological and Methodological Considerations*. Journal of endodontics. 40 (10). pp:1517-1523.
- [2] Almeida, F. C. R. (2015). *Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar*. Construction and Building Materials. 82. pp: 81-88.
- [3] Arboláez, I. A. y Griffin M. S. (2005). *Evaluación de la hoja del maíz como posible fuente de material puzolanico*. Tecnología y construcción. 21 (3), pp: 09-18.
- [4] Beltran et al. (2014). *Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair*. Construction and Building Materials. 67, pp: 344-352.
- [5] Chanu, N. M. y Devi, Th. K. (2013). *Contribution Of Rice Husk Ash To The Properties Of Cement Mortar And Concrete*. International Journal of Engineering Research & Technology. 2 (2), pp: 1-7.
- [6] Faria, K.C.P. (2012). *Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks*. Journal of Environmental Management. 101. pp:7 – 12.
- [7] Gandolfi, G.M. et al. (2008). *New Portland Cement-based Materials for Endodontics Mixed with Articaïne Solution: A Study of Cellular Response*. Journal of Endodontists. 34 (1), pp: 39-44.
- [8] Garbalinska, H. y Wygocka, A. (2014). *Microstructure modification of cement*

mortars: Effect on capillarity and frost-resistance. *Construction and Building Materials*. 51. pp: 258-266.

[9] Hussein, A, A, E. (2014) *Compressive Strength and Microstructure of Sugar Cane Bagasse Ash Concrete*. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*,7 (12), pp: 2569-2577.

[10] Kanning et al. (2014). *Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement*. *Construction and Building Materials*. 54, pp: 460-465.

[11] Kim et al. (2014). *Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar*. *Construction and Building Materials*. 75, pp: 242-246.

[12] Li, H. et al. (2003). *Microstructure of cement mortar with nano-particles*. *Composites: Part B*. 35. pp: 185-189.

[13] Lin, K. L. et al. (2009). *Influence of phosphate of the waste sludge on the hydration characteristics of eco-cement*. *Journal of Hazardous Materials*. 168, pp: 1105-1110.

[14] Macedo, C,P. (2014) *Rendimiento de morteros producidos con la incorporación de ceniza de bagazo de caña de azúcar*. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29 (2), pp:187:99.

[15] Mahmoud, H. et al. (2012). *Groundnut shell ash as a partial replacement of cement in sandcrete blocks production*. *International Journal of Development and Sustainability*. 1 (3), pp: 1026-1032.

[16] Mangulkar, M.N. y Jamkar, S.S. (2013). *Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning*. *International Journal Of Scientific & Engineering Research*. 4 (5). pp: 143-148.

[17] Piyanut, M. et al. (2012). *Effects of Fine Bagasse Ash on the Workability and Compressive Strength of Mortars*. *Chiang Mai Journal of Science*, 40(1). pp: 126-134.

[18] Sabdono, P. et al. (2014). *The effect of nano-cement content to the compressive strength of mortar*. *Procedia Engineering*. 95. pp: 386 – 395.

[19] Shafiq, Nuruddin y Elhameed, A.A. (2014) *Effect of Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) on Sulphate Resistance of Concrete*. *International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*, 3 (49), pp: 64-67.

[20] Tay, R.F. et al. (2007). *Calcium Phosphate Phase Transformation Produced by the Interaction of the Portland Cement Component of White Mineral Trioxide Aggregate with a Phosphate-containing Fluid*. *American Association of Endodontists*.. 33 (11), pp: 1347-1351.

[21] Wang, Y. et al. (2013). *Physical filling effect of aggregate micro fines in cement*



concrete. Construction and Building Materials. 41. pp: 812-814.

[22] Yashwanth .M .K y Nareshkumar, B. G. (2014). *An Experimental Study on Bagasse ash as Replacement for Cement in Lightweight Concrete*. International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology, 3 (3), pp: 253-260.

TESIS

[1] Araujo, M. L.G. (2011). *Evaluación de tres materiales puzolanicos del bajío para su aplicación como materiales de construcción sustentable*. Tesis de licenciatura. México, Universidad Tecnológica de Querétaro.

[2] Arellanes, S. R. (2008). *Propiedades Mecánicas y Microestructura de concreto Conteniendo Mucilago de Nopal como aditivo Natural*. Tesis de Maestría. México, Oaxaca. Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca.

[3] Arteaga, A. J. C. (2009). *Comportamiento Mecánico y Caracterización de Morteros Elaborados con Cemento Portland Ultra finó*. Tesis Doctoral. México, D.F., Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigaciones en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Legaría.

[4] Mariano, M. R. R. (2008). *Determinación de la Reactividad Puzolanica de Adiciones Minerales de Origen Natural con el Cemento Portland*. Tesis de Maestría. México, Oaxaca. Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca.

[5] Pérez, C. E. L. (2006). *Revisión, análisis y aplicación de la nanotecnología en la generación y mejora de materiales constructivos. estudio de morteros de cemento con adiciones de nanosilice*. Tesis de licenciatura. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela Ingeniería Civil en Obras Civiles.

[6] Robalino, H. D. M. (2012). *Diseño del proceso de elaboración de un producto para, a partir del hidróxido de calcio resultante de la combustión de la piedra caliza. Tesis de licenciatura*. Ecuador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química.

[7] Romero, S. A. J. (2007). *Caracterización de morteros con adición o sustitución de diferentes materiales carbonosos*. Tesis Doctoral. Alicante, España. Universidad de Alicante.

[8] Vélez, M.A. (2010). *concreto Nanotecnológico; Resistencia Mecánica de Cementos Reforzados con partículas Sub micrométricas*. Tesis de Maestría. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Campo de conocimiento en Tecnología.

[9] Vélez, M.A. (2016). *Endurecimiento de Cementos tipo Portland por medio de Fosfatos y/o Silicatos*. Tesis Doctoral. México, Universidad Nacional Autónoma de

México, Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Campo de conocimiento en Tecnología.

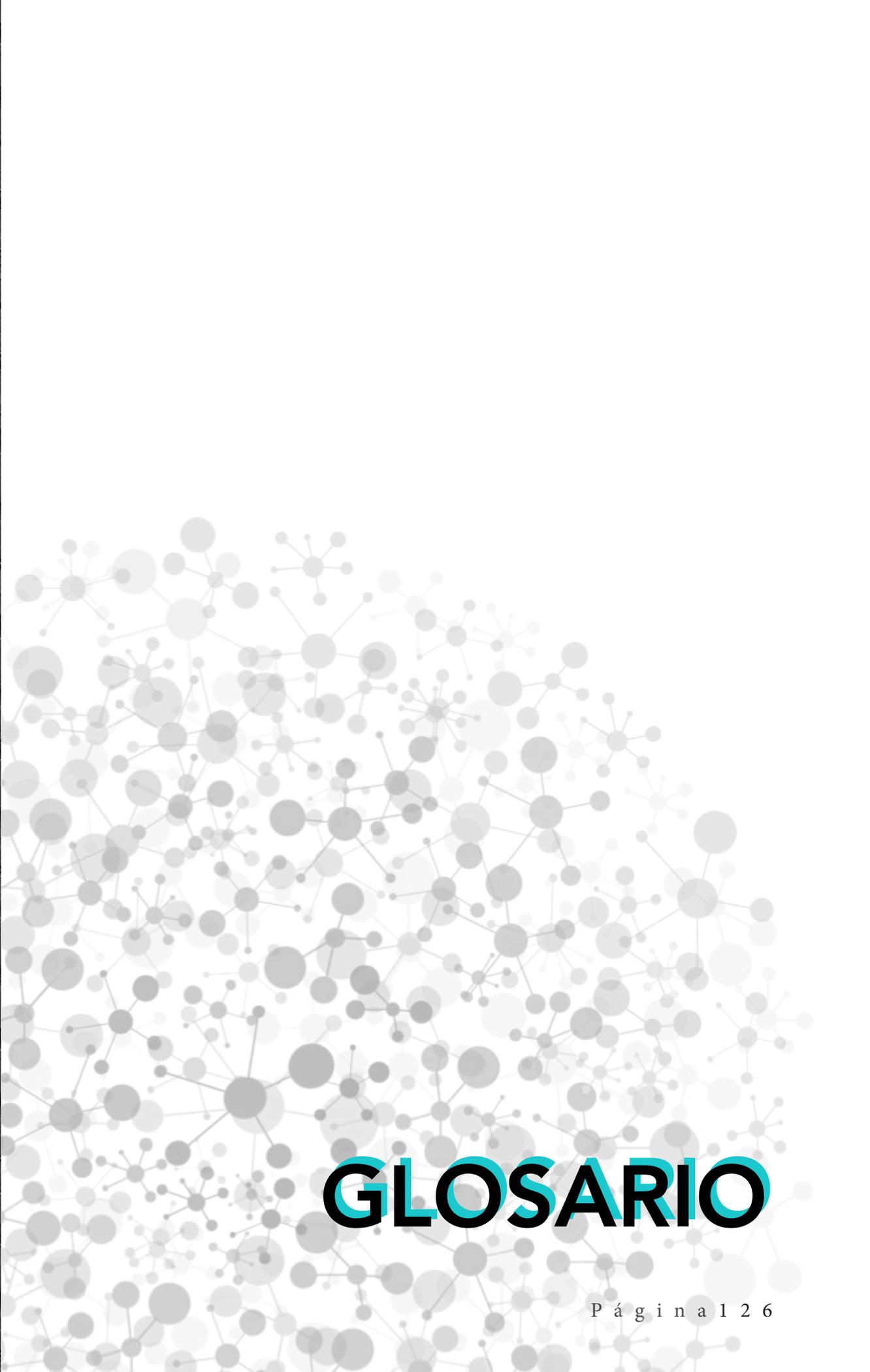
NORMAS.

- [1] ASTM C 109/C 109M. (2007). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*.
- [2] ASTM C33/C33M – 13. (2004). *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- [3] ASTM C 270 – 07. (2002). *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*.
- [4] ASTM C 144 – 04. (1997). *Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar*.
- [5] ASTM C1714/C1714M – 13^a. (2002). *Standard Specification for Preblended Dry Mortar Mix for Unit Masonry*.

DIRECCIONES ELECTRÓNICAS.

- [1] Cementos Cruz Azul, <http://www.cruzazul.com.mx/productos.html>.
- [2] Instituto Mexicano del Cemento y Concreto. <http://www.imcyc.com/ct2008/feb08/puntodefuga.htm>.
- [3] Luminultra. http://www.luminultra.com/dmdocuments/Product%20Validation%20-%20Cement_Concrete%20Admixtures%20QGOM.pdf
- [4] Microestructura del Cemento. <http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Microestructura%20del%20cemento.pdf>
- [5] The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures. <http://www.rilem.org/gene/main.php?base=500179>





GLOSARIO

Acelerador – sustancia que al ser añadida a un concreto o mortero aumenta la velocidad de hidratación del cemento hidráulico, acorta el tiempo de fraguado o aumenta la velocidad de endurecimiento, desarrollo de la resistencia, o ambos.

Agregado – material granular, tal como la arena, grava, piedra molida, concreto de cemento hidráulico molido o escoria de alto horno molida, empleado junto con un medio de cemento hidráulico para elaborar concreto o mortero.

Alita – nombre empleado por Tornebohm (1897) para identificar el silicato tricálcico con pequeñas cantidades de MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃ y otros óxidos; es un componente principal del clinker de cemento p \acute{o} rtland.

Belita – nombre empleado por Tornebohm (1897) para identificar una forma del componente del clinker de cemento p \acute{o} rtland que en su forma pura ahora se conoce como silicato dicálcico (2CaO·SiO₂).

Adherencia – agarre del concreto o mortero a las armaduras o a otras superficies contra las cuales se lo coloca, incluyendo la fricción debida a la contracción y corte longitudinal en el concreto debida a las deformaciones de las barras; adherencia de la pasta cementicia a los agregados; adherencia entre capas de enlucido o entre el enlucido y un estrato inferior debida a las propiedades adhesivas o cohesivas del enlucido u otros materiales suplementarios.

Superficie de adherencia – superficie nominal de la interface entre dos elementos a través de la cual se desarrolla o se puede desarrollar adherencia, como por ejemplo entre el concreto y las armaduras.

Hidrato de silicato de calcio (C-H-S)– cualquiera de los diversos productos de la reacción de silicato de calcio y agua, a menudo se producen por curado en autoclave.

Catalizador – sustancia que inicia una reacción química y permite que ésta continúe bajo condiciones menos severas que las que se requerirían si dicha sustancia no estuviera presente; esta sustancia no altera la reacción ni participa en la misma.

Celita – nombre empleado por Tornebohm (1897) para identificar el componente aluminoferrita de calcio presente en el cemento p \acute{o} rtland.

Cemento hidráulico – cemento que fragua y endurece por interacción química con el agua y es capaz de hacerlo bajo el agua.

Clinker – producto de un horno parcialmente fundido que se muele para fabricar cemento; también otros materiales vitrificados o calcinados.

Resistencia a la compresión – máxima resistencia medida de 28 una probeta de concreto y/o mortero a carga de compresión axial; se expresa como fuerza por unidad de superficie de la sección transversal; también la resistencia especificada que se usa en los cálculos de diseño.



Curado – mantenimiento de un contenido de humedad y una temperatura satisfactorios en el concreto durante sus etapas tempranas de manera que se puedan desarrollar las propiedades deseadas.

Silicato dicalcio – compuesto cuya composición es $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, abreviada C2S; una de sus formas impuras (belita) se da en el clinker de cemento pórtland.

Etringita – un mineral, sulfoaluminato de calcio con alto contenido de sulfato, $(3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O})$ que también se expresa como $\{\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{O}-\text{H})_6]_2\cdot24\text{H}_2\text{O}\}[(\text{SO}_4)_3\cdot16\text{H}_2\text{O}]$; se da en la naturaleza o se forma por el ataque con sulfato sobre el mortero o el hormigón; el producto de la principal reacción expansiva en los cementos expansivos; anteriormente se la conocía como “cement bacillus”.

Felita – nombre usado por Tornebohm (1897) para identificar una forma del componente del clinker de cemento pórtland que ahora, en su forma pura, se conoce como dicalcio silicato ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).

Fractura – grieta o fisura, como las que se producen en el concretoo la mampostería; configuración de una superficie fracturada; también la acción de agrietarse o quebrarse.

Micrón – término obsoleto que se usaba para designar una unidad de longitud igual a una milésima de milímetro o una millonésima de metro; fue reemplazado por el micrómetro (μm).

Consistencia plástica – condición de una pasta cementicia, mortero u concreto fresco que es capaz de soportar deformaciones sin llegar a la rotura.

Porosidad – relación entre el volumen total de vacíos de un material y el volumen total de dicho material, incluyendo los vacíos, expresada como porcentaje.

Puzolana – material silíceo o silíceo y aluminoso que en sí mismo posee escaso valor cementicio pero que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas habituales formando compuestos que poseen propiedades cementicias.

Fraguado – condición alcanzada por una pasta cementicia, mortero u concreto que ha perdido plasticidad hasta un nivel arbitrario, generalmente medido en términos de la resistencia a la penetración o deformación; fraguado inicial se refiere a la primera rigidización; fraguado final se refiere a una rigidez significativa; también, deformación remanente luego de retirada la tensión.

Silicato tricalcio – compuesto cuya composición química es $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ y se abrevia C3S; una de sus formas impuras es un componente principal del cemento pórtland.



ANEXOS

Análisis estadístico de los resultados de resistencia a la compresión de morteros obtenidos en la investigación mediante la guía para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión del concreto, ACI Committee 214.

Un resultado óptimo de las pruebas de resistencia a compresión de un lote de concreto, no puede basarse solamente en el resultado obtenido de un cilindro sometido a dicha prueba, es así que la norma ASTM C-109 “Método de resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, usando moldes para especímenes de 2 pulgadas” establece en su apartado 8 “test specimens” que el dato de una prueba de resistencia a la compresión será la fuerza media de al menos dos o tres cubos de 5 x 5 centímetros del mismo lote de concreto a la misma edad de prueba.

En este procedimiento estadístico, se supone que los resultados de las pruebas de resistencia siguen una distribución normal. La figura A1 muestra la “forma de campana curva” característica de la distribución normal. La distribución normal se define matemáticamente por dos parámetros estadísticos: la media poblacional μ y la desviación estándar σ . Una característica matemática de la distribución normal es que 68.27% de los datos se encuentra dentro de σ , y que 95.45% de los datos están dentro de 2σ . En la figura A1; N indica el número de muestras; s la desviación estándar de la muestra, que es una estimación de σ ; V el coeficiente de variación; y X la media muestral que estima μ .

Según Cook (1982)¹⁰² al evaluar las pruebas de resistencia del concreto, una distribución normal no siempre se puede suponer, por ello es apropiado utilizarla en la mayoría de los casos cuando la resistencia del concreto no exceda los 10.000 psi (70 MPa).

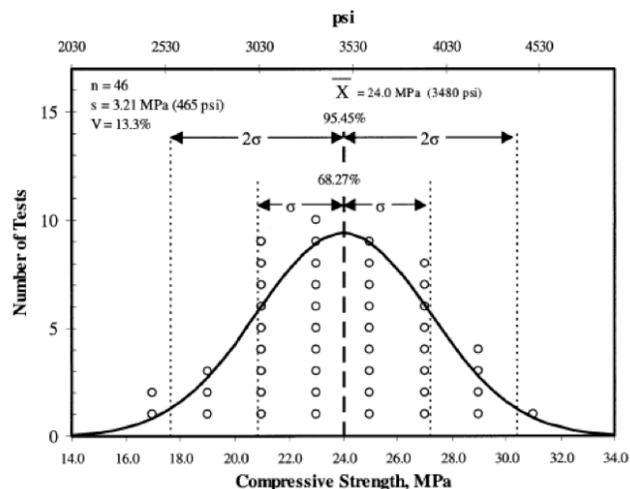


Figura A1.- Distribución de la frecuencia de datos de la resistencia a la compresión y la correspondiente distribución normal de estos.

¹⁰² Cook, J. E., 1982, “Research and Application of High-Strength Concrete Using Class C Fly Ash,” *Concrete International*, V. 4, No. 7, July, pp. 72-80.

Funciones estadísticas

Es así que la teoría de las probabilidades proporciona un elemento muy práctico para la valoración de los resultados de los ensayos de resistencias. Como consecuencia de los numerosos factores que tienen influencia sobre la resistencia del concreto y de las variaciones que cabe esperar, los ensayos aislados no son representativos como una base para actuar y es importante que sea conocida estadísticamente la exactitud de un promedio observado.

Media

La media de un conjunto finito de números es el valor característico de una serie de datos cuantitativos, objeto de estudio que parte del principio de la esperanza matemática o valor esperado, se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{1}{n} \sum X_i = \frac{1}{n} (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n)$$

Desviación Estándar

La desviación estándar es una medida de la variabilidad de los valores de las resistencias; es el radio de giro del área comprendida bajo la curva de probabilidad teórica, alrededor del centro. Numéricamente se determina de la siguiente forma:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Según Sparkes (1954)¹⁰³, el grado de control está por regla general, relacionado con la variabilidad de la resistencia a compresión del concreto, de forma aproximada, como se expresa a continuación:

Grado de Control	Desviación Estándar (Kp/cm2)
Excelente	28
Bueno	42
Medio	56
Pobre	70
Nulo	85

Tabla A1.- Grado de control mediante la Desviación Estándar.

103 Sparkes, P.N. (1954). El control de la calidad del hormigón: una revisión del punto de vista actual. "Proceedings" de un simposio sobre el proyecto de mezclas y control de calidad del hormigón. Londres.



Coefficiente de variación

La desviación estándar, expresada como un porcentaje de la resistencia media, se denomina coeficiente de variación:

$$s_1 = \frac{1}{d_2} \bar{R}$$

La función V hace posible expresar el grado de dispersión en valor porcentual mejor que en un valor absoluto. Este también puede ser utilizado como un índice del grado de control y el estándar general de calidad del concreto.

Rango

En estadística el rango se encuentra restando la fuerza del cilindro con resistencia a la compresión más baja de la fuerza del cilindro con resistencia a la compresión más alta.

Variaciones de resistencia

Cuando existan juegos de probetas de 10 o menos elementos, la desviación estándar dentro de un mismo volumen de concreto y el coeficiente de variación pueden calcularse de la siguiente forma:

Variabilidad en el lote

Como con cualquier estimador estadístico, la confianza en la estimación es una función de la cantidad de resultados de la prueba.

Aunque se prefiere una muestra de más de 30 pruebas en la estimación de la resistencia a la compresión, la desviación típica s_1 dentro de lote puede estimarse a partir de la gama media R de al menos 10 especímenes de la misma edad.

El valor apropiado de d_2 se puede seleccionar de la Tabla 4.1 basado en el número de muestras representadas en cada concentración de resultados obtenidos en la prueba. La tabla fue extraída del Manual ASTM 7A. El aumento de los valores de d_2 es debido a que, para una población con una desviación estándar dada, el rango esperado de un conjunto de cuatro muestras es mayor que el de dos.

Numero de especimenes	d_2
2	1.128
3	1.693
4	2.059

Tabla A2.- Factores para la desviación estándar para lotes del rango de pruebas utilizando dos, tres, o cuatro ejemplares.

Coefficiente de variación corregido

El coeficiente dentro de un lote de variación V1, expresando la cantidad de variación en porcentaje de la fuerza media, se determina a partir de la desviación típica y la resistencia media X dentro del lote.

$$V = \frac{s}{\bar{X}} \times 100$$

Estándares de control

Un propósito principal de la evaluación estadística de los datos de concreto es identificar las fuentes de variabilidad. Este conocimiento puede ser utilizado para determinar las medidas adecuadas manteniendo el control de calidad. Varias técnicas pueden ser utilizadas para detectar las variaciones en la producción de hormigón, procesamiento de materiales y la manipulación, y las operaciones de los contratistas y la organización de estandarización. Un método sencillo es comparar la variabilidad en general y dentro de la variabilidad del lote usando la desviación estándar o el coeficiente de variación, según el caso, con el rendimiento anterior.

La Tabla A3 da normas de control apropiadas para concretos con f'c hasta 5000 psi (35 MPa). Estas normas de control se adoptaron basándose en el examen y el análisis de los datos de resistencia a la compresión por los Comités ACI 214, Evaluación de las pruebas de esfuerzo, y ACI 363, de concretos de alta resistencia. Los ensayos de resistencia se llevaron a cabo usando cilindros de 6 x 12 pulgadas (150 x 300 mm). Las normas de control son, por lo tanto, aplicable a los especímenes de este tamaño que se han probado a los 28 días. Estas normas pueden ser aplicables con diferencias menores a otros tamaños de cilindros, tales como 4 x 8 pulg. (100 x 200 mm), como se reconoce en la norma ASTM C31 / C31M.



Clase de operaciones	Coeficiente de variación para los diferentes estándares de control			
	excelente	bueno	medio	pobre
Variación total:				
(I) construcción en general	inferior a 10.0	10.0 a 15.0	15.0 a 20.0	sobre 20.0
(II) control de laboratorio	inferior a 5.0	5.0 a 7.0	7.0 a 10.0	sobre 10.0
Variaciones dentro de una misma mezcla:				
(I) control en obra	inferior a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	sobre 6.0
(II) control de laboratorio	inferior a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	sobre 5.0

Tabla A3.- Estándares de control del concreto, ACI committee 214.

Detwiler et al. (2006)¹⁰⁴ así como las normas ASTM C39 / C39M, demuestran que el coeficiente global dentro de lotes de variación en los cilindros de 4 x 8 pulgadas (100 x 200 mm) fue ligeramente superior en comparación con los cilindros de 6 x 12 pulgadas (150 x 300 mm) en la misma mezcla de concreto. Por lo tanto, para reducir la variación de los resultados en la prueba de los cilindros de 4 x 8 pulgadas (100 x 200 mm), la resistencia media de al menos tres cilindros de 4 x 8 pulgadas (100 x 200 mm) deben ser utilizados para determinar la resistencia a la compresión, como lo es requerido por el ACI 318.

Como medida del error dentro de los lotes de los cilindros, algunos autores internacionales encuentran un promedio de diferencias de hasta 145 psi (1 MPa) representante del “buen” control, y aceptan las diferencias de hasta 290 psi (2 MPa) como control “aceptable” (Day 2006)¹⁰⁵.

104 Detwiler, R. J. et al., (2006), “Acceptance Testing Using 4 x 8 in. Cylinders,” Concrete International, V. 28, No. 1, Jan., pp. 81-86.

105 Day, K. W., (2006), Concrete Mix Design, Quality Control and Specification, 3 edition, E&FN Spon, 391 pp.

Octubre, 2016.

Autor: Ing. Edrey Nassier Salgado Cruz..

Director de tesis: Dr. Alberto Muciño Velez.

Algunos derechos reservados.



Excepto cuando se establezca lo contrario, esta tesis de investigación está bajo licencia de Creative Commons y bajo propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México. Para ver una copia digital de esta tesis diríjase a Tesiunam.

Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente el presente trabajo bajo ciertas condiciones:

Reconocimiento: Debe reconocer los créditos de los autores de esta publicación de manera específica (Pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que se hace de esta)

No comercial: No puede utilizarse el presente trabajo para fines comerciales a menos que sea requerido ante la Universidad Nacional Autónoma de México.

Sin obras derivadas: No se puede alterar, transformar o modificar el presente trabajo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
MAESTRIA EN TECNOLOGIA, POSGRADO DE ARQUITECTURA

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2016.