



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO.



FACULTAD DE CIENCIAS.

**Relación de microestructura mecánica contra
Composición química de morteros de
cementos Portland Mexicanos.**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

FÍSICO.

PRESENTA:

EMMANUEL VILLA FLORES.

Bajo la dirección de:

DRA. LORENA ROMERO SALAZAR.
DR. JUAN CARLOS ARTEAGA ARCOS.

Toluca México a 18 de Junio del 2015.

Resumen.

Este trabajo nace a partir del mega proyecto de innovación que lleva como nombre “Caracterización micro-mecánica de los productos de hidratación de cemento Portland Mexicano, segunda etapa” con clave UAEM3396/2013M, bajo la dirección del Dr. Juan Carlos Arteaga Arcos, proyecto el cual presenta un problema de alto impacto a nivel nacional e internacional puesto que el mortero es un material empleado para la construcción desde épocas muy remotas, hasta hoy en día no se ha logrado comprender al 100% el mortero, por lo que los resultados obtenidos en este trabajo pueden aportar valiosa información sobre este material, sumado a lo anterior, en esta tesis se engloba tanto la parte física como la parte de ingeniería, lo cual convierte a este trabajo en uno multidisciplinario.

Se realizó un estudio sobre 7 muestras diferentes de mortero de cemento tipo Portland Mexicano, con la finalidad de poder crear una relación entre sus propiedades micromecánicas y la composición química de cada una de las muestras, enfocándose principalmente en comparar los módulos de elasticidad respecto al porcentaje de concentración de las especies químicas de manera que se pueda ver que tanto es lo que influye al módulo de elasticidad la presencia de mayor o menor concentración de cierta especie contenida en el mortero de cemento.

Para lograr establecer dicha relación entre la composición química y las propiedades micromecánicas del mortero de cemento tipo Portland, se empleó un microscopio conocido por sus siglas en inglés como A.F.M., o Microscopio de fuerza atómica, con este instrumento se obtuvieron micrografías de tamaño micrométricos mediante las cuales se obtuvieron valores para calcular el módulo de elasticidad para establecer posteriormente una relación entre la parte química y la micromecánica.

Para el análisis fisicoquímico de la muestra se consideraron la composición química y las reacciones básicas del proceso de hidratación del Mortero. Por ello se desarrolló una simulación de la reacción entre las principales especies contenidas en el cemento tipo Portland en presencia de agua; en este trabajo se muestran los resultados para una reacción sencilla entre la alita (C_3S) y el agua ($6H$), ya que la especie de la alita es la que se encuentra en mayor abundancia comparada con el resto de las especies contenidas en el mortero y el cemento Portland, la cantidad de agua incluida en la simulación fue consistente con la norma ASTM Designation C109/C 109M; esta simulación fue realizada en la plataforma del Comsol Multiphysics® bajo la licencia 3074607. Cabe señalar que la reacción básica fue modelada utilizando la ecuación de Avrami.

Los resultados así obtenidos muestran relación entre la composición química y las propiedades micromecánicas para las 7 muestras estudiadas.

Motivación.

Esta tesis presenta un problema de alto impacto a nivel nacional e internacional, puesto que los mortero de cemento son uno de los materiales más utilizados en todo el mundo para crear infraestructuras de todo tipo, por eso es tan importante que se logre obtener una relación de su microestructura para tener una mayor comprensión sobre este a modo que en un futuro se puedan crear mejores cementos entre otras cosas posibles.

Este problema no solo engloba a la física, también la ingeniería juega un papel muy importante dentro de estos objetivos, por lo que esta tesis se trata de un trabajo interdisciplinario entre la física y la ingeniería lo cual enriquecerá todos los resultados obtenidos tanto a nivel microscópico como a nivel macroscópico.

No solamente mediante el uso de un microscopio de fuerza atómica se obtendrán todos los resultados experimentales, sino que también se utilizara la simulación mediante el uso del software Comsol Multiphysics® el cual ayudara a simular un modelo donde se pueda ver la difusión del agua a través de los granos del cemento y la arena, y también el proceso de hidratación y reacción del cemento con el agua durante el paso del tiempo.

Contenido

1	Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1	Reseña histórica del cemento y mortero Portland.....	1
1.2	Introducción al cemento Portland.....	3
1.3	Justificación.....	4
1.4	Objetivo.....	5
1.5	Desglose del trabajo escrito.....	5
2	Capítulo 2. El cemento Portland, conceptos y características.....	7
2.1	Procesos de hidratación del cemento Portland.....	7
2.2	Fraguado del cemento Portland.....	8
2.3	Reología en el cemento Portland.....	8
2.4	Mortero de cemento Portland.....	8
2.5	La microestructura del cemento Portland.....	9
2.6	Tipos de cemento Portland.....	10
3	Capítulo 3. Marco Teórico.....	12
3.1	Especies en la hidratación del mortero de cemento Portland.....	12
3.2	Nanoindentaciones mediante el A.F.M.....	12
3.3	Caracterización del mortero de cemento Portland mediante nanoindentaciones por el microscopio de fuerza atómica (A.F.M.).....	18
3.4	Modelo de Hertz.....	18
4	Capítulo 4. Desarrollo experimental.....	25
4.1	Preparación de las muestras de mortero de cemento tipo Portland.....	25
4.1.1	Descripciones generales sobre las muestras.....	25
4.1.2	Método de mezclado de las muestras de mortero con el agua para obtener las pastas de mortero.....	25
4.1.3	Colocación de las pastas de mortero en los blísteres y reposo.....	26
4.1.4	Encapsulamiento de las muestras de mortero.....	27
4.2	Proceso de preparación de las muestras para su uso en el A.F.M.....	31
4.2.1	Proceso de lijado.....	31
4.3	Uso del A.F.M. sobre las muestras de mortero.....	34
4.3.1	Datos del A.F.M.....	34
4.3.2	Proceso de nanoindentación.....	34

4.4	Simulación mediante el software Comsol Multiphysics®.....	37
4.4.1	Modelo de simulación de reacción y flujo para el mortero de cemento tipo Portland.....	38
5	Capítulo 5. Resultados.....	45
5.1	Resultados de las nanoindentaciones del A.F.M.....	45
5.2	Resultados de la simulación en <i>Comsol Multiphysics®</i>	68
6	Capítulo 6. Conclusiones.....	81
7	Anexos.....	84
	Glosario.....	84
8	Referencias.....	86

Índice de Gráficas.

Figura 1.1	Mortero de cemento antes de ser hidratado.....	4
Figura 3.1	Esquema del proceso de indentación, a) Perfil de una huella producida por un indentador (durante y después de la aplicación de una carga). B) Curva de carga desplazamiento producida durante el contacto (Tomada de Meza et al., 2006).....	14
Figura 3.2	Esquema del funcionamiento de un Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) ..	16
Figura 3.3	<i>Representación esquemática de los parámetros requeridos para el cálculo del módulo de elasticidad basado en nanoindentación por AFM.....</i>	21
Figura 3.4	Reticula que indica los puntos y las regiones donde	22
Figura 3.5	Ejemplo de una gráfica fuerza contra desplazamiento.....	23
Figura 4.1	Muestras de mortero después de su preparación.	26
Figura 4.2	Muestras de mortero en agua y cal durante su etapa de hidratación de 28 días.	27
Figura 4.3	Muestras de mortero listas para ser encapsuladas.	28
Figura 4.4	Muestras de mortera preparadas de manera incorrecta.....	29
Figura 4.5	Muestras de cemento encapsuladas.....	30
Figura 4.6	Superficie de la muestra después del proceso de lijado vista desde un microscopio óptico con zoom 3.2X.....	32
Figura 4.7	Paño del roto martillo con las pastas de diamante.	33
Figura 4.8	Superficie de la muestra de mortero lista para analizarse en el A.F.M.....	34
Figura 4.9	Muestra de mortero vista desde la cámara frontal del A.F.M.....	35
Figura 4.10	Micrografía obtenida correctamente con el A.F.M.	36
Figura 4.11	Micrografía con mucho ruido del A.F.M.	36
Figura 4.12	Grano de arena visto desde un microscopio estero óptico, zoom 10X.	38
Figura 4.13	<i>Granos de cemento al lado de uno de arena zoom 40X.....</i>	
Figura 4.14	Geometría dibujada en el comsol multiphysics® para la simulación.	40
Figura 5.1	Micrografías de A.F.M. de la muestra de mortero 1.	48
Figura 5.2	<i>Micrografías de A.F.M. de la muestra de mortero 2.....</i>	48
Figura 5.3	Micrografías de A.F.M. de la muestra de mortero 3.	49

Figura 5.4 Micrografías de A.F.M. de la muestra de mortero 4.	49
Figura 5.5 Micrografías de A.F.M. de la muestra de mortero 5.	50
Figura 5.6 Micrografías de A.F.M. de la muestra de mortero 6.	50
Figura 5.7 Micrografías de A.F.M. de la muestra de mortero 7.	51
Figura 5.8 Gráficas de deformación contra desplazamiento en la arena para las 7 muestras de mortero.	54
Figura 5.9 Gráficas de deformación contra desplazamiento en el cemento para las 7 muestras de mortero.	56
Figura 5.10 Gráficas de deformación contra desplazamiento en la interfaz para las 7 muestras de mortero.	58
Figura 5.11 Distribución de módulos de elasticidad en arena, a) muestra 1, b) muestra 3, c) muestra 4, d) muestra 5, e) muestra 6.	66
Figura 5.12 Distribución de módulos de elasticidad en cemento, a) muestra 1, b) muestra 2, c) muestra 3, d) muestra 4, e) muestra 5, f) muestra 6, g) muestra 7.	67
Figura 5.13 Distribución de módulos de elasticidad en interface cemento-arena, a) muestra 1, b) muestra 2, c) muestra 3, d) muestra 4, e) muestra 5, f) muestra 6, g) muestra 7.	68
Figura 5.14 Tiempo de reacción y concentraciones de especies resultantes del silicato tricálcico (C ₃ S) con el agua (6H)	69
Figura 5.15 Concentraciones de las especies con las ecuaciones de Avrami y Arrhenius.	71
Figura 5.16 Concentración de agua a 4 horas, utilizando la ecuación de Avrami y la de Arrhenius.	72
Figura 5.17 Concentración de la alita a 4 horas, utilizando la ecuación de Avrami y Arrhenius.	73
Figura 5.18 Concentración de silicato de calcio hidratado a 4 horas, utilizando la ecuación de Avrami y Arrhenius.	74
Figura 5.19 Concentración de Portlandita a 4 horas, utilizando la ecuación de Avrami y Arrhenius.	75
Figura 5.20 Difusión y concentración del agua a tiempos a) 3.12 h, b) 3.20 h, c) 3.40 h, d) 3.52h.	76
Figura 5.21 Concentración y reacción del alita (C ₃ S) a tiempos a) 3.12 h, b) 3.13 h, c) 3.25 h, d) 3.52h.	77
Figura 5.22 Generación del silicato de calcio hidratado (CSH) a tiempos a) 3.12 h, b) 3.13 h, c) 3.25 h, d) 3.52 h.	79
Figura 5.23 Generación de la Portlandita (CH) a tiempos a) 3.12 h, b) 3.13 h, c) 3.25 h, d) 3.52 h.	80

Tablas.

Tabla 2.1 Tipos de cemento Portland regulados en México.	11
Tabla 5.1 Composición química de las 7 muestras de cemento CPO30R (% en peso)	46
Tabla 5.3 Pendientes de las gráficas (5.8).	61

Tabla 5.4 Pendientes de las gráficas (5.9).....	62
Tabla 5.5 Pendientes de las gráficas (5.10).....	62
Tabla 5.6 Valores obtenidos para el módulo de elasticidad, las pastas de cemento y la región interfacial.....	64
Tabla 5.7 Concentraciones iniciales y finales calculadas para la reacción de la alita con el agua.....	70
Tabla 5.8 Concentraciones iniciales y finales obtenidas mediante el Comsol Multiphysics® para la reacción de la alita con el agua.....	70