

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY
DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA**



**DISEÑO DE UN CONCRETO DE ALTO
DESEMPEÑO PARA SU EXPOSICION EN UN
AMBIENTE ACIDO, PREDICCIÓN DE SU VIDA
UTIL Y ANALISIS DEL COSTO DE
SU CICLO DE VIDA**

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA CIVIL
ACENTUACION EN INGENIERIA Y
ADMINISTRACION DE LA CONSTRUCCION**

JUAN CARLOS ESCOBEDO SALAZAR

MAYO DE 1999

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**DISEÑO DE UN CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO PARA SU EXPOSICION
EN UN AMBIENTE ACIDO, PREDICCIÓN DE SU VIDA ÚTIL, Y ANÁLISIS DEL
COSTO DE SU CICLO DE VIDA**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADEMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA CIVIL
ACENTUACION EN INGENIERIA Y ADMINISTRACION DE LA
CONSTRUCCION**

JUAN CARLOS ESCOBEDO SALAZAR

MAYO DE 1999

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a las siguientes personas e instituciones, por su valiosa cooperación para la realización de la presente investigación:

- Dr. César Nuñez e Ing. Tomás Butrón J., del Laboratorio de Materiales Industriales, del Centro de Sistemas Integrados de Manufactura, del Campus Monterrey, por las facilidades y la extensa operación del microscopio electrónico de barrido.
- A ENERMEX, S.A. de C.V., en especial al Ing. Francisco Romo, y al Ing. Jesús Treviño Molinar, por la información proporcionada para el caso de estudio, el ácido sulfúrico, y el contenedor.
- Al Ing. M. Antonio Puente P. y a Roberto de la Mora M., por la guía para la localización exacta del banco de basalto, y la recolección de muestras.
- A EUCOMEX, S.A. de C.V., a la Ing. Maritza Moreno Muñiz, por proporcionar el aditivo superplastificante y los humos de sílice.
- Al Laboratorio Central de Puentes Y Caminos (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC), a Francois de Larrard y Thierry Sedran, por la inmensa información compartida sobre concreto de alto desempeño, y en especial por proporcionar el algoritmo del Modelo de Suspensión de Sólidos.
- Al U.S. Army Corps of Engineers, en especial a Mr. Bryant Mather, por la información proveída sobre la historia del desarrollo de especificaciones de nuevos productos basados en cemento.
- Université de Sherbrooke, Departamento de Ing. Civil, a Richard Gagné y Pierre-Claude Aïtcin, por información proveída, y compartir sus experiencias en concreto de alto desempeño.
- Al ACI ConREF, y William H. Plenge, por información proveída sobre propuestas de programas nacionales de investigación en concreto de alto desempeño, en E.U.

- Al NIST, a la Oficina de Economía Aplicada del BFRL, en especial a Mark A. Ehlen, por la información proporcionada con respecto al análisis económico de nuevos materiales de construcción, y su atención con respecto al BridgeLCC 1.0.
- A Concrete Canada, en especial a su director Pierre-Claude Aïtcin, por compartir su gran experiencia en concreto de alto desempeño, además de proporcionar una gran cantidad de información.
- A CEMBUREAU, y Mrs. Eliane Lacroux, por haber proporcionado la información requerida.

Capítulo I. Introducción	1
a) Industria del Cemento y del Concreto a nivel Mundial	1
b) Importancia del uso del cemento	3
c) Introducción al Concreto de Alto Desempeño	5
Definición	5
Conceptualización	6
Usos actuales	12
Referencias	14
Capítulo II. Problemática	16
a) Aspectos generales de la problemática en estructuras de concreto por efectos de la durabilidad	16
b) Caso de Estudio	17
Referencias	20
Capítulo III. Selección de los Agregados Pétreos	21
Referencias	26
Capítulo IV. Consideraciones sobre el humo de sílice	27
Referencias	31
Capítulo V. Consideraciones sobre los aditivos superplastificantes	32
Referencias	36
Capítulo VI. Definición Granulométrica	37
Referencias	42
Capítulo VII. Diseño del Mortero de Alto Desempeño	43
Capítulo VIII. Experimentación	47
Referencias	78
Capítulo IX. Análisis de Costos del Concreto	79

Capítulo X. Análisis del costo del ciclo de vida del mortero de alto desempeño	86
Referencias	96
Capítulo XI. El Concreto de Alto Desempeño y su Impacto en el Desarrollo Sostenible	97
Referencias	102
Capítulo XII. Conclusiones	103
Capítulo XIII. Apéndice.	107
Propuesta de Tesis	
Introducción	107
Planteamiento del problema	108
Objetivo	110
Antecedentes	110
Justificación	111
Marco Teórico	111
Modelo Particular	112
Alcance de la Investigación	112
Impacto y Contribución	112
Metodología	112
Referencias	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Producción mundial de cemento	1
Tabla 1.2. Consumo de cemento por habitante	1
Tabla 1.3. Producción de cemento por país	2
Tabla 3.1. Clasificación parcial de la plagioclasa	21
Tabla 7.1. Granulometría del agregado	43
Tabla 7.2. Dosificación de la mezcla de mortero de alto desempeño	44
Tabla 8.1. Resultados del experimento	50
Tabla 8.2. Apreciaciones cualitativas del experimento	52
Tabla 8.3. Imágenes Microscópicas	56
Tabla 9.1. Determinación del costo del mortero de alto desempeño	80
Tabla 10.1. Costos considerados para el Ciclo de Vida	90
Tabla 10.2. Costo del Ciclo de Vida, considerando mortero premezclado	91
Tabla 10.3. Costo del Ciclo de Vida, considerando mortero fabricado en obra	91
Tabla 10.4. Sensibilidad con respecto al periodo de rehabilitación del sistema de mortero de alto desempeño	92
Tabla 10.5. Sensibilidad con respecto a la variación de las tasas	93
Tabla 10.6. Relación entre los dos sistemas bajo el análisis de sensibilidad	93
Tabla 11.1. Comparación de parámetros de eco-eficiencia entre algunos materiales de construcción	101

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 8.1. Razón de pérdida de peso	50
Gráfica 8.2. Pérdida de resistencia	51
Gráfica 8.3. Pérdida de resistencia actual	51
Gráfica 8.4. Variación del pH del medio agresor	52

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 3.1. Roca de basalto	23
Imagen 3.2. Distribución típica del banco de rocas de basalto	23
Imagen 3.3. Estructura de basalto	24
Imagen 3.4. Calcita incrustada en huecos	24
Imagen 3.5. Apreciación gráfica de la densidad del basalto	25
Imagen 3.6. Microestructura del basalto	25
Imagen 8.1 y 8.2. Especímenes antes y después del ensaye a compresión	57
Imagen 8.A. Distribución de los especímenes en contenedor de ensaye	57
Imagen 8.B. Aplicación del ácido	57
Imagen 8.C. Aplicación del ácido	58
Imagen 8.D. Coloración del ácido en el contenedor, al inicio de la prueba	58
Imagen 8.3. Aspecto de los especímenes a las 24 horas de ataque	58
Imagen 8.4. Cambio de coloración entre la zona atacada y la zona sana	59
Imagen 8.E. Cambio de coloración del ácido a las 24 horas de inicio	59
Imagen 8.5. Aspecto de los especímenes a los 3 días de ataque	59
Imagen 8.6. Fallas a la compresión especímenes 3 días de ataque	60
Imagen 8.7. Aspecto de los especímenes a los 7 días de ataque	60
Imagen 8.8. Fallas a la compresión especímenes 7 días de ataque	60
Imagen 8.9. Aspecto de los especímenes a los 7 días de ataque	61
Imagen 8.10. Fallas por el ensaye de compresión a los 14 días de ataque	61
Imagen 8.11. Apariencia de los especímenes a los 21 días de ataque	61
Imagen 8.12 y 8.15. Diferencias entre el espécimen testigo final y el de 28 días en ataque	62
Imagen 8.14. Fallas por el ensaye de compresión a los 28 días de ataque	62
Imagen 8.16. Falla a la compresión de los especímenes testigo final	63
Imagen 8.F. Coloración del ácido al término de los 28 días de la prueba	63
Imagen M8.1. Zona de ataque del ácido 1 día	64
Imagen M8.2. Zona de ataque del ácido 1 día	64
Imagen M8.3. Zona de la interfase con un agregado 1 día	65
Imagen M8.4. Una grieta por falla mecánica rodea a un agregado. 1 día	65
Imagen M8.5. Zona sana 1 día	66
Imagen M8.6. Acercamiento a la fase hidratada 1 día	66
Imagen M8.7. Zona de ataque 3 días	67
Imagen M8.8. Zona sana adjunta a la zona de ataque 3 días	67
Imagen M8.9. Interfase pasta-agregado 7 días	68

Imagen M8.10. Zona de ataque 7 días	68
Imagen M8.11. Zona de ataque 7 días	69
Imagen M8.12. Vista generalizada de la zona de ataque 7 días	69
Imagen M8.13. Zona de ataque 7 días	70
Imagen M8.14. Zona de transición entre la fase sana y la atacada 7 días	70
Imagen M8.15. Acercamiento a la transición de fases 7 días	71
Imagen M8.16. Vista de la muestra 14 días	72
Imagen M8.17. Apreciación del ataque 14 días	72
Imagen M8.18. Generalización de la zona atacada 14 días	73
Imagen M8.19. Vista de la zona de cambio de fase 14 días	73
Imagen M8.20. Zona de cambio de fases 14 días	74
Imagen M8.21. Acercamiento al cambio de fases 14 días	74
Imagen M8.22. Zona de cambio de fases 14 días	75
Imagen M8.23. Zona de transición de fases 14 días	75
Imagen M8.24. Vista general de la muestra testigo	76
Imagen M8.25. Matriz densa muestra testigo	76
Imagen M8.26. Humos de sílice en proceso de reacción muestra testigo	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 9.1. Croquis del sistema de piso

81

Diseño de un concreto de alto desempeño para su exposición en un ambiente ácido, predicción de su vida útil, y análisis del costo de su ciclo de vida.

I.- Introducción

a) **Industria del Cemento y del Concreto a nivel Mundial**

Según información de CEMBUREAU, más de mil millones de toneladas de cemento se elaboraron cada año entre 1990 y 1995. Considerando que en promedio se necesitan 250 Kg de cemento para producir un metro cúbico de concreto, se puede estimar que más de 4.4 mil millones de metros cúbicos de concreto se elaboraron en cada uno de esos años¹.

Tabla 1.1 Producción mundial de cemento.¹

Producción mundial de cemento, de acuerdo a CEMBUREAU					
	Millones de toneladas				
	1990	1991	1992	1993	1994
Producción total mundial	1141.5	1167.3	1239.5	1296.8	1388.4
Como porcentaje de 1990 figuran	Año referencia	+ 2%	+ 9%	+ 14%	+ 22%

Como un metro cúbico de concreto pesa alrededor de 2.5 ton. , estos 4.4 mil millones de metros cúbicos de concreto pesarian cerca de 11 mil millones de toneladas: casi dos toneladas de concreto por ser humano en el planeta. Sólo el agua corriente se ha consumido más intensamente en este periodo de tiempo.

Tabla 1.2 Consumo de cemento por habitante.¹

Consumo del cemento por habitante por país, de acuerdo a CEMBUREAU			
	Consumo por habitante		
	kg / año		Variación como un porcentaje de 1990
	1990	1994	
Luxemburgo	1150	1185	+ 3.0%
Suiza	831	678	-18%
Grecia	751	686	-9%
Italia	748	609	-19%
España	704	612	-13%
Portugal	698	768	+ 10%
Japón	680	643	-5%
Francia	448	347	-23%
EUA	322	329	+ 2.2%
China	184	331	+ 80%

Sin embargo, el uso del concreto no es uniforme en todos los países, pero se puede apreciar que aunque se ha empleado más en los países industrializados, se está intensificando su empleo en los países en vías de desarrollo.

Tabla 1.3 Producción de cemento por país.¹

Producción de cemento en diferentes países, de acuerdo a CEMBUREAU			
	Porcentaje de Producción de Cemento		
	Millones de toneladas por año		Variación como un porcentaje de 1990
	1990	1994	
China	208	405	+ 95%
Japón	84.4	91.6	+ 8.5%
EUA	68.6	75.9	+ 10.6%
India	47.3	61.5	+ 30%
Italia	40.8	33.0	-19%
Korea del Sur	33.3	51.7	+ 55%
España	28.1	25.2	-10%
Francia	26.4	20.0	-24%
Brasil	25.8	25.2	-2.3%
Turquía	24.4	30.1	+ 23%
México	23.8	27.6	+ 16%
Taiwan	19.4	23.4	+ 21%
Tailandia	18.8	31.1	+ 65%

Por lo tanto, por medio de este estudio mundial, se podría señalar que la industria del cemento y del concreto tiene un largo camino por recorrer, por lo menos durante los próximos 50 años, puesto que se muestra una clara tendencia hacia el incremento en el consumo de cemento por parte de los países con economías emergentes.

También se debe enfatizar que, con la globalización de la economía, se generará mayor consumo de cemento, puesto que este fenómeno económico tiene como resultado la frecuente y sucesiva creación de compañías y la formación de bloques comerciales de libre operación (ya característicos de la economía en este fin de milenio), además, se afectará el crecimiento de cada sector industrial y el éxito (o inclusive la supervivencia) de algunas compañías se basará en su eficiencia e impacto ambiental, así como su habilidad para cambiar y adaptarse a los nuevos escenarios económicos y sociales, propiciando que el desarrollo, cantidad y calidad de la infraestructura de todos los países sean lo más semejantes posible,

convirtiéndose en un reto para los países en desarrollo, dado que tendrán que hacer fuertes inversiones para alcanzar la nivelación requerida.

Será relativamente fácil para la industria cementera implementar una estrategia de desarrollo global más eficiente, porque no existen muchas plantas cementeras en el mundo y cualquier cambio sería más posible de adaptar; sin embargo, usando la actual tecnología de fabricación del cemento, las 2000 plantas existentes de producción de cemento con capacidad de 1 millón de toneladas de clinker por año pueden producir cemento suficiente para abastecer las necesidades del mundo en el corto plazo.²

b) Importancia del uso del cemento.

Durante el siglo XX el concreto ha llegado a ser el material de construcción más ampliamente usado, con un consumo de más de 1m³ por habitante del planeta. Es uno de los materiales más versátiles empleados por el ser humano, desde hace dos siglos. Virtualmente no existe alguna estructura construida que no incluya componentes fabricados con concreto o mortero; por lo menos la cimentación es de concreto en edificios de estructura metálica, y también se encuentra presente en la mayoría de los sistemas de losas de entrepiso.

El uso del concreto se ha difundido y generalizado mucho, principalmente por algunas de las siguientes razones:

- El concreto es internacional (y eventualmente podría ser intergaláctico); se fabrica para quien lo requiere sin interés en su idioma, nacionalidad, clima, nivel cultural, nivel económico, credo, etc., y sus ingredientes se encuentran casi en cualquier parte del mundo.
- El concreto se fabrica localmente; el agua siempre es de origen local, frecuentemente el cemento y los agregados; otros ingredientes como las puzolanas y los aditivos requieren de cierto procesamiento. Normalmente el 85% de sus ingredientes es de origen local.
- El concreto no es un material costoso; con un costo cercano a \$0.40 por Kg. aparentemente no existe alternativa más barata para construir a cualquier nivel.
- El concreto es muy versátil; se emplea en todas las construcciones, y según datos de la Portland Cement Association, casi el 50% se emplea en edificación; en puentes, canales y caminos, cerca del 25%; en ciertos sectores tales como cortinas de presas y pistas de aeropuertos, el concreto es el material medular. Existen otros usos importantes en tuberías y

sistemas de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas, estructuras marinas, túneles y silos, y también se usa en reparaciones y mantenimiento de las mismas estructuras. ⁶

- La tecnología del concreto es simple, se puede hacer una variedad infinita de concretos, tanto en propiedades mecánicas, eléctricas, dieléctricas, táctiles, químicas, de pigmentación, de consistencia, etc.; y cada característica se puede hacer repetible y uniforme, su producción no requiere de una tecnología sofisticada.
- El concreto es durable; si el concreto se diseña correctamente para la aplicación que tendrá, considerando el ambiente que se presenta, y los materiales disponibles, durará tanto como se desee que dure, pero puede tener una vida indefinida, como algunas rocas con varios millones de años de edad. Tiene buena resistencia al fuego y al agua, es usualmente durable bajo una gran variedad de ambientes, y no es atacado por los insectos. ³

Considerando los antecedentes históricos de la presencia del concreto, se tiene información de que fue usado por los Egipcios desde el año 200 a. C., aunque también se han encontrado restos de morteros de cal en pisos del año 5600 a. C. En nuestro país se encuentra una losa de techo con concreto ligero, con una cal como cementante, en la zona arqueológica de El Tajín, en Papantla, Veracruz, construida por lo menos en el siglo XII d. C. ⁴

En una ciudad moderna, la construcción de vivienda, infraestructura, vías de comunicación (incluyendo telecomunicaciones), hace riguroso el uso del concreto en una u otra forma o escala, favoreciendo el intercambio comercial y cultural entre las comunidades, que es origen del enriquecimiento y la globalización de la civilización. ⁵

La urbanización ha sido la facilitadora de la riqueza, bienestar y majestuosidad, de civilizaciones como la Egipticia, los Incas, los Aztecas, los Romanos, que se desarrollaron entre altos niveles de eficiencia por lo que se refiere a su infraestructura y vivienda. En la actualidad, la urbanización es uno de los parámetros que mide el grado de desarrollo de las comunidades. ⁶

Por lo tanto, el periodo del uso del concreto como material de construcción se encuentra prácticamente indefinido, dado que faltan muchas comunidades por alcanzar el nivel de vida y urbanización al que teóricamente conduce la globalización de la economía en forma progresiva (aunque hasta la fecha también se puede apreciar el avance de la pobreza en forma progresiva), y es muy probable que esta transición dure algunas décadas. ⁷

c) Introducción al Concreto de Alto Desempeño

Definición.

Con el rápido desarrollo que en la última década se ha venido dando en la formulación, elaboración y disponibilidad de los aditivos químicos para concreto, en especial los reductores de agua de alto rango (que frecuentemente y de cariño se les llama superplastificantes), se ha revolucionado de manera espectacular la tecnología del concreto. Cuando anteriormente sólo se podía mejorar la consistencia de un concreto añadiendo agua, haciendo prohibitiva una relación agua/cemento final menor a 0.40, ahora sería muy común tener concreto con relaciones agua/cemento (a/c) de 0.30.

Sin embargo, la reducción en la relación a/c y el contenido total de agua en la mezcla, trae otras propiedades mucho más importantes a señalar, como la reducción de capilares y poros totales de la pasta, lo cual da un material mucho más denso y homogéneo, impactando notablemente las características de permeabilidad y resistencia del concreto. El mejoramiento de las propiedades de impermeabilidad del concreto nos asegura una mayor resistencia a la entrada de humedad, que de manera conjunta con agentes agresivos, tales como iones de cloro, sulfatos, bióxido de carbono, ácidos, sales, etc. (inclusive bacterias) lesionan significativamente su estado físico y químico. ⁸

De acuerdo con el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras, del Consejo Nacional de Investigación de Estados Unidos, el Concreto de Alto Desempeño se puede definir cuantitativamente por medio de 3 factores: ⁹

- Características de resistencia mecánica
 - a) Resistencia a la Compresión a 4hr ≥ 17.5 MPa
 - b) Resistencia a la Compresión a 24hr ≥ 35 MPa
 - c) Resistencia a la Compresión a 28 días ≥ 70 MPa
- Factor de durabilidad mayor del 80% después de 300 ciclos de congelamiento-descongelamiento (puede ser por medio de la prueba ASTM C-666)
- Relación agua/cementantes ≤ 0.35

El Instituto Americano del Concreto (ACI) por medio de su Comité en Concreto de Alto Comportamiento lo define en términos cualitativos, como *un concreto que cumple con requerimientos especiales de comportamiento que no siempre pueden ser alcanzados rutinariamente usando solo constituyentes convencionales y procedimientos normales de mezclado, colocado y curado. Estos requerimientos pueden involucrar incrementos o mejoras de lo siguiente:*

- Facilidad de colocación y compactación sin segregación.
- Propiedades mecánicas en el largo plazo.
- Resistencia a edades tempranas.
- Dureza.
- Estabilidad volumétrica.
- Vida en medios ambientes severos.

Por lo tanto, su definición no se encuentra estandarizada, dado que el uso y enfoque que se le da al concreto, hace muy variada su definición.

Conceptualización.

Su clasificación por medio de parámetros cuantitativos no sólo debiera ser sobre la base de su resistencia mecánica (compresión o flexión), sino incluir obligatoriamente límites de permeabilidad de iones cloro, resistencia a la abrasión, contracción e intemperización.

El empleo del concreto de alto desempeño tiene muchas repercusiones en el ámbito de la construcción, incluyendo a la industria de la fabricación del cemento y del concreto.

La elaboración del concreto de alto desempeño no siempre puede efectuarse con los procedimientos tradicionales del concreto normal. La selección de los ingredientes es crítica porque requiere de un conocimiento experto para establecer su eficiente compatibilidad tanto en la parte física como en la química.

El primer ingrediente a seleccionar es el cemento. Aunque intuitivamente se debiera escoger un cemento de alta resistencia, la investigación más reciente señala que no es tanto la resistencia de los materiales en sí la que va a dar un alto desempeño (no sólo se evalúan factores físicos, sino también la durabilidad y la eficiencia en el uso de los materiales), sino la forma como interactúan entre sí; esto es, al seleccionar los materiales se debe procurar que no existan tantas discrepancias entre la pasta de cemento y el agregado, que pueda dar una interfase con cambios abruptos. Visto de otra manera, si se va a emplear un agregado suave, es altamente probable que se requiera una pasta con características similares de elasticidad y porosidad a las del agregado para optimizar su uso; si por otra parte se tiene un agregado muy resistente, obviamente se debe elaborar una pasta de cemento con características similares en cuanto sea posible a las del agregado. Entonces la selección del cemento se hace en función del agregado, aunque claro está que cada mezcla de concreto se debe diseñar de acuerdo al servicio que vaya a prestar,

tanto en el aspecto de resistencia, como en la durabilidad, la cual se olvida frecuentemente. La cantidad de cemento total en la mezcla de concreto de alto desempeño normalmente es alta, pero su sustitución parcial por puzolanas finalmente no la hace tan notable, solo se debe cuidar el efecto en las propiedades reológicas de la mezcla, aunque ya se ha establecido que una cantidad mayor de 500 Kg/m³ podría considerarse eventualmente como normal.¹⁰

La selección de los agregados tradicionalmente se ha efectuado de acuerdo a su disponibilidad y su facilidad de explotación, dicho esto último en términos comerciales, dado que el usuario del concreto prácticamente considera cualquier agregado como la parte de relleno del concreto, inerte (aunque se ha demostrado ampliamente que el agregado es una parte con mucha actividad en el concreto y también sufre o desarrolla reacciones químicas y físicas) y debe ser el ingrediente más económico. Sin embargo, el mismo desarrollo de la ingeniería civil, en especial la tecnología del concreto, ha requerido más investigación en la caracterización y selección de los agregados. Para el concreto de alto desempeño generalmente se habla de agregados triturados, de tamaño máximo relativamente pequeño (12-14mm), con baja absorción, una granulometría suave, en pocas palabras, un agregado casi perfecto. Sin embargo, nuevamente se vuelve a que el uso del concreto es lo que rige las características deseables de los ingredientes. Para algunos casos será necesario desarrollar un análisis petrográfico (incluyendo su estudio mineralógico) intenso para caracterizar al agregado; en otros casos la definición granulométrica (que dicho sea de paso, también debe considerar de manera conjunta el estudiar la granulometría del cemento y aditivos minerales) se diseña de acuerdo a las características reológicas deseables del concreto, pero a ningún uso o tipo del concreto le viene mal el ser autocompactable, tan sólo por una perfecta especificación de la granulometría total de la mezcla y optimización de la viscosidad, que permitiría hacer un uso menor de los aditivos superplastificantes. Sin embargo el empleo de algunos modelos de curvas granulométricas empleadas comúnmente para concreto normal ha dado buenos resultados¹⁰. El aspecto primordial es el estudiar la interacción del agregado y la pasta del cemento (o mortero) en la interfase, por lo cual un agregado con buenas características de adherencia (pero sobre todo con una elasticidad similar a la de la matriz) siempre es exigible, ya que el concreto de alto desempeño tiene un comportamiento mecánico más acorde al de un material compuesto donde la transferencia de esfuerzos debe de ser eficaz. El diferencial entre el módulo de elasticidad de los agregados y el de la pasta de cemento debe de minimizarse en lo posible.¹¹

Un ingrediente medular del concreto de alto desempeño es el aditivo químico, especialmente los superplastificantes. La selección de un aditivo superplastificante se debe basar principalmente en su probada compatibilidad con el cemento, ya que el grado de sulfonación de los aditivos y los sulfatos

residuales entre otros componentes de los aditivos, varían demasiado entre los diversos fabricantes de los mismos. Su uso debe ser moderado, ya que un empleo excesivo tiende a modificar los periodos de fraguado de la mezcla, y también al hacerla más viscosa no se libera eficientemente el aire atrapado.

También la inclusión de aditivos minerales, tales como humos de sílice, ceniza volante, escoria de alto horno pulverizada, en las mezclas de concreto de alto desempeño es considerada como necesaria; estas puzolanas traen muchos beneficios, inclusive en el estado fresco al modificar la reología y por su tamaño tan fino actúan eficientemente como un relleno microscópico. En el aspecto durable del concreto es donde se hace más notable su efecto, puesto que su actividad puzolánica disuelve los productos de hidratación del cemento más débiles, formando compuestos más resistentes química y físicamente. ²

La aplicación de los conceptos anteriores ha permitido lograr relaciones agua/cemento bastante bajas para un concreto, del orden de 0.20 a 0.35, lo cual ha tenido como resultado una matriz de concreto escasamente permeable, con pocos poros, de menor tamaño y normalmente aislados unos de otros; con una mayor resistencia a la abrasión, resistencia a la compresión de los 60 a los 150MPa a los 28 días, altas resistencias iniciales, y una gran absorción de energía cuando es sometido a cargas como la producida por sismos. Todo esto trae como resultado una mejor utilización de los materiales, y por lo tanto de los recursos naturales. ²

Como resultado del estudio más intenso de sus propiedades mecánicas, se ha demostrado que, para fines del cálculo estructural, las ecuaciones empleadas para el diseño de elementos de concreto normal ya no precisan eficientemente el comportamiento del concreto de alto desempeño, debido a que algunas, como el módulo de elasticidad, hacen referencia al peso volumétrico del concreto, sin embargo un concreto de alto desempeño no es mucho más pesado de uno normal, no así su módulo de elasticidad y su resistencia a la contracción volumétrica. ¹²

La aplicación en la industria de la construcción del concreto de alto desempeño ha generado nuevas líneas de investigación, como la necesidad de desarrollar pruebas que permitan evaluar eficientemente su trabajabilidad, dado que la prueba de revenimiento tiene sus limitantes, ya que solo considera el esfuerzo de cedencia de la mezcla, más no su viscosidad, pues ésta se mide de manera dinámica. Dicho de otro modo, el esfuerzo de cedencia es el esfuerzo necesario para iniciar el movimiento de la masa de concreto, pero su viscosidad se puede relacionar como la energía para mantenerla en movimiento, aunque su definición la refiere como la pendiente de una recta de esfuerzo contra el índice de corte (de un fluido de Bingham). La viscosidad es un parámetro de relevancia para la bombeabilidad y

fluidez del concreto, además de que influye directamente en la clasificación de los agregados en la masa del concreto fresco.¹³

Otro aspecto sumamente relevante, presentado en la práctica, es la dificultad para darle un buen acabado. Lamentablemente no existe prueba alguna para determinar cuantitativamente esos parámetros, solo existe una clasificación informal cualitativa. Generalmente se ha encontrado que es un material pegajoso, debido principalmente al empleo de aditivos, a su viscosidad, y que con las relaciones agua/cemento tan bajas no existe sangrado. El problema se ha hecho tan crítico que algunas veces no se ha empleado en elementos constructivos que requieren de un acabado manual (como losas) si se prefieren seguir el procedimiento ordinario para concreto normal. El concreto de alto desempeño requiere de nuevas estrategias para su colocación y acabado, ya que sus altas prestaciones bien valen la pena. Se ha recomendado que el acabado debe terminarse dentro de los 30 minutos siguientes al colado.¹³

Aunque en la práctica la hidratación total del cemento no se logra,¹⁴ el curado en la obra debe ser más rápido y más eficaz, dado que la ausencia de sangrado provoca que las capas superiores se deshidraten más rápidamente, con la potencialidad del surgimiento de contracción plástica. Las medidas de protección se deben tomar cuando la evaporación sea mayor de 0.3 Kg/m²/hr, en vez del valor de 0.5 recomendado por ACI. El periodo de curado se extiende de acuerdo con el tipo de curado, dimensiones del elemento, y otras características inherentes a la microestructura de la matriz,¹⁵ la cual se considerará más adelante, pero se debe tener especial atención cuando los aditivos químicos retarden los tiempos de fraguado, dado que también se atrasa el desarrollo de resistencia; además, se debe considerar que el periodo de curado tiene un efecto inversamente proporcional a la contracción, así como a la permeabilidad y porosidad final¹⁶.

La práctica del curado del concreto de alto desempeño requiere un trato especial, ya que este tipo de concreto necesita del ingreso de agua para un curado eficaz, puesto que se auto-deshidrata por el proceso del consumo de agua para las reacciones químicas.^{17,18} Por esta causa, la velocidad de hidratación en las primeras edades es muy alta, pero después cae abruptamente,¹⁹ cuando se ha consumido la totalidad del agua, y la actividad puzolánica también requiere de agua y en un mayor periodo de tiempo. Sin embargo, la reacción puzolánica de los humos de sílice es mucho más rápida que los de cualquier puzolana, debido principalmente a la hidratación del C₃S del cemento que se hidrata más rápidamente con la presencia de partículas de humo de sílice¹⁵, creando de esta manera una secuencia circular de hidratación. Además, los mismos humos de sílice (sin reaccionar químicamente) resisten el microagrietamiento causado por la hidratación y su dispersión, y disminuyen la cantidad total de grietas,²⁰

en la interfase, este efecto es muy importante, ya que la microgrieta reduce el módulo de elasticidad de la zona de pasta o mortero circundante, aumentando la diferencia entre módulos de elasticidad.²¹

También se debe de considerar que dadas las bajas características de permeabilidad del concreto de alto desempeño, éste presenta una gran resistencia a la penetración del agua, especialmente cuando contiene humos de sílice, además, la presión capilar debe ser de 0.8 de la presión de saturación para que se efectúe la hidratación del cemento.²² La situación se complica más cuando se disminuye el tamaño de los agregados, dado que un agregado mayor incrementa la permeabilidad en la interfase, puesto que normalmente disminuye la densidad de empaque de la mezcla, y aumenta significativamente el efecto de pared con los tamaños menores de agregado y los propios productos de hidratación.¹⁷

Una manera bastante novedosa de realizar un curado eficiente en toda la masa de concreto (es necesario entender que el curado se inicia desde la superficie del concreto y su avance hacia el interior está en función de la permeabilidad, el tamaño de los capilares, y si se encuentran interconectados, características que en el concreto de alto desempeño se encuentran en magnitudes muy pequeñas, en parte por la adición de ingredientes tan finos como las puzolanas, y la discontinuidad del sistema de capilares dada la baja relación agua/cemento, por lo que en algunas ocasiones se la ha considerado como insensible a las condiciones de curado cuando éste es prolongado), es el incluir una parte de agregado ligero en la mezcla, que generalmente es muy poroso, puesto que absorbe cierta cantidad de agua y la libera una vez que está adentro, dando de esta manera un curado más uniforme en toda la masa de concreto. Aunque se ve afectada la resistencia del concreto por el empleo parcial de un agregado más suave, también se ha desarrollado un proceso de optimización en función de la resistencia a la compresión, el empleo de agregados ligeros y la eficiencia del curado, resultando que una relación óptima es emplear un 25% de agregado ligero saturado²³ (claro, de acuerdo con las características del agregado), y tenemos de esta manera un concreto de alto desempeño que sería prácticamente "auto-curable".

Otro aspecto sobresaliente del concreto de alto desempeño con humos de sílice, es que en clima caliente presenta un buen comportamiento, dado que los capilares no son tan grandes como en un concreto normal, reduciendo de esta manera la pérdida de agua y su desplazamiento desde el interior de la mezcla. Mientras que en un concreto normal la reducción de la permeabilidad durante un curado húmedo de 4 días es de un 50%, para un concreto de alto desempeño se reduce de 3 a 4 veces.²⁴

Nuevamente es necesario determinar que la técnica y el tiempo de curado deben de seleccionarse de acuerdo a la estructura de concreto que se trate, y también considerando cuales son las características

principales deseables en el concreto: resistencia a la abrasión, a la carbonatación, a la tensión y compresión; y la permeabilidad.^{25,16.}

Otro tipo de agrietamiento que se puede presentar, es el causado por el gradiente térmico debido a las grandes cantidades de cemento que se emplean en el concreto de alto desempeño. La reacción exotérmica provocada por la hidratación y el diferencial de temperatura de las superficies del concreto provoca severos agrietamientos en el interior de la matriz, aún en estructuras no-masivas. Lógicamente esto no se produce cuando tenemos una temperatura ambiente similar a la producida por la reacción del cemento en el interior del concreto; este efecto también se puede controlar con la adición de las puzolanas, ya que éstas sustituyen parcialmente al cemento, y la temperatura producida por su actividad puzolánica es mucho más baja, además que se difiere a través del tiempo, y una vez que el concreto ya ha endurecido y ha ganado cierta resistencia a la tensión. Sin embargo en las primeras edades se debe tener mucha precaución, ya que se ha encontrado que puede durar hasta 5 días para que la masa de un concreto de alto desempeño iguale a la temperatura ambiente.²⁶ Uno de los aspectos a considerar para evitar el agrietamiento térmico, es mantener con una temperatura baja el concreto en estado fresco, ya que se ha encontrado que el efecto en esta etapa tiene un impacto mucho mayor que la temperatura ambiente inclusive en las etapas posteriores ²⁶. La manera más fácil, eficiente y económica de enfriar en concreto en estado fresco es por medio de hielo molido en la mezcla como parte del agua.

El efecto en la adherencia al acero de refuerzo del concreto de alto desempeño ha demostrado grandes ventajas con respecto al concreto normal, ya que de acuerdo a su alta resistencia a la tensión y al confinamiento producido por la fuerte contracción (más esta contracción no es grande en magnitud, debemos recordar que una de las principales características del concreto de alto desempeño es su estabilidad volumétrica). El efecto se acentúa en varillas corrugadas de diámetros pequeños (#3, #4), dado que el incremento en la adherencia es de aproximadamente un 80% ²¹. La adherencia se debe en parte a la presencia de las puzolanas, ya que por su tamaño, tienden a agruparse en las zonas cercanas al acero donde hay espacios vacíos, y es donde se desarrolla la actividad puzolánica, que resulta en productos de hidratación de mejor calidad que los productos de hidratación del cemento.

Un aspecto importante que es necesario incluir, es que algunas pruebas que se especifican para concreto normal, probablemente ya no lo sean para el concreto de alto desempeño. Tal es el caso del análisis de los agregados para determinar su potencial reactividad álcali-agregado en el concreto de alto desempeño. Después de haber discernido varios métodos para la implementación de una prueba eficaz, se determinó que el concreto de alto desempeño pudiera ser susceptible de reactividad, a pesar de que es

una masa densa, impermeable, con poca presencia de agua, dado principalmente al contenido de aire que generalmente aumenta conforme se incrementa el consumo de aditivo, puesto que aumenta la viscosidad que impide la liberación de las partículas atrapadas de aire.²⁷

Con la ayuda de la informática, se ha implementado ya la teoría del concreto de alto desempeño en sistemas computacionales.^{28,29} Aunque se modelan varias características del concreto (consistencia, resistencia a la compresión, contenido de aire, porosidad, inclusive los costos, etc.), es obvio que solo se deben emplear para señalar una tendencia en cuanto a la variación de los ingredientes, para la posterior toma de decisiones, por lo cual disminuyen notablemente el trabajo de mezclado en laboratorio. Existe un sistema computacional de demostración para diseño de mezclas que se puede obtener a través de la tecnología de Internet en el sitio de web <http://www.lcpc.fr/LCPC/English/Service/BETONLAB>, llamado precisamente BETONLAB™. También se ha implementado en sistemas computacionales un modelo de optimización de la granulometría, para ser usado en conjunto con un sistema de diseño de mezclas²⁹. Considerando el avance que se presenta constantemente en la investigación del concreto de alto desempeño, es muy probable que pronto se tenga disponible un sistema computacional que además serviría para el aseguramiento de la calidad del concreto.

Dada la aceptación cada vez mayor que se le da al concreto de alto desempeño, es necesario hacer varios ajustes en la metodología de calidad que se ha usado profusamente (más no en México) para el concreto normal, dado que los tiempos de manejo del concreto de alto desempeño en estado fresco se acortan ligeramente, además que es un material mucho más susceptible a cualquier variación en parámetros tales como las condiciones ambientales, velocidad de trabajo en la obra, procedimientos de curado, condiciones de colado, procedimiento de mezclado, etc. Se deben hacer mayores esfuerzos para asegurar el control de calidad desde que se inicia la dosificación de materiales en la planta premezcladora, donde la presencia activa de los inspectores debe ser continua, hasta que el concreto es entregado en la obra. Por su parte, en la obra donde se entregará el concreto, ya se debe estar listo para la recepción. Esto es muy importante dado que cualquier prolongación en el mezclado hace que se pierda la trabajabilidad, la cual se corrige casi inmediatamente con aditivo, dando una masa más viscosa, por lo tanto con más aire y con mayor riesgo de alteración del tiempo de fraguado y ganancia de resistencia.³⁰ Es evidente que se requiere una planeación muy meticulosa para el proyecto.³¹

Usos actuales.

Aunque todavía no recibía el nombre de concreto de alto desempeño, un concreto con tales características se utilizó en Chicago en 1975 para la construcción del Water Tower Place, con una

resistencia a la compresión de 62 MPa en las columnas de los niveles inferiores, donde se comprobó el beneficio del ahorro de sección en todos los miembros estructurales.³²

Mientras que en Estados Unidos se ha empleado generalmente para la construcción de edificios, como el Two Union Square en Seattle, en el que se empleó un concreto con 120 MPa (en parte para tener un mayor módulo de elasticidad en las columnas, para que los ocupantes en los niveles más altos tuvieran aceptables índices de confort), en Francia se ha usado extensamente en puentes, en elementos de concreto postensado, y exitosamente en la construcción del esplendoroso "Arco de la Defensa" en París con un concreto de 85 MPa.

Actualmente en Canadá, se encuentra en proceso un programa a nivel nacional sobre concreto de alto desempeño que ya está en su etapa de transferencia de tecnología, con el fin de hacer un uso masivo de este material, siendo la construcción pionera en este país, la Scotia Plaza en Toronto en 1988, donde se empleó un concreto de 80 MPa de resistencia a la compresión.³³

Dado que el concreto normal empleado en carreteras y puentes frecuentemente falla para prevenir la intrusión de humedad e iones agresivos como los sulfatos y cloruros, a la masa de concreto endurecido, se requieren concretos de baja permeabilidad y buena resistencia a la abrasión. Además se requiere que la clausura temporal de los carriles sea lo más corta posible, por lo que un material de rápido desarrollo de resistencia es indispensable. Por estas razones, las oficinas de transporte de Estados Unidos, tanto estatales como federales están cambiando al concreto de alto desempeño para la construcción, rehabilitación y reparación de puentes y caminos. Además emplean un producto de mayor desarrollo de resistencia denominado Pyrament, que es un concreto de alto desempeño con aditivos especiales para una rápida ganancia de resistencia aún en climas fríos.³⁴ Inclusive se han evaluado cualitativamente las ventajas en el aspecto económico y la influencia de las condiciones climatológicas sobre el material en estado fresco y endurecido, además de que se ha analizado la metodología para el diseño de un pavimento rígido y sus posibles cambios mediante el empleo del concreto de alto desempeño.³⁵

Recientemente se hizo mención especial sobre el incremento que ha tenido el concreto de alto desempeño para la pavimentación rápida (fast-track paving), rehabilitación y reparación particularmente por white topping en capas delgadas y ultra-delgadas (que alcanza una resistencia de hasta 50MPa en dos días) y su factibilidad económica. También es interesante la investigación que se está haciendo en materia de caminos con sistemas rígidos, aún en países con grandes reservas de petróleo.³⁶

Referencias

- ¹ Aïtcin, Pierre-Claude. *Concrete: The most widely used construction material*. Adam M. Neville Symposium on Concrete Technology. 1995
- ² Aïtcin, Pierre- Claude. *High Performance Concrete*. Capítulo 20.
- ³ Mather, Bryant; Mather, Katherine. *Reflection on concrete durability and on International Conferences on Concrete Durability*. ACI special publication SP-100. 1987
- ⁴ Web site del Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. <http://www.conaculta.gob.mx>
- ⁵ ACI, PAC, AISC, AISI, ASCE, CERF, National Ready Mixed Concrete Association, Suppliers of Advanced Composite Materials Association, The Aluminium Association, ConREF. *High Performance Material and Systems. An essential program for America and its infrastructure*. Executive Report. 1993.
- ⁶ Everaldo Marciano Junior; Pierre-Claude Aïtcin. *Present use of cement and concrete*. WABE International Symposium on Cement and Concrete. 1998.
- ⁷ Sunder, S; et al. *High Performance Concrete Construction; Advanced Technology Program*. Focused Program Recommendation. 1995
- ⁸ Aïtcin, Pierre- Claude; Baalbaki, Moussa. *High Performance Concrete presented at the International Workshop on High Performance Concrete on Bangkok*. 1994.
- ⁹ Zia, et al. *High Performance Concrete –A state of the art report*, SHRP C/FR-91-103, NCSU. 1991.
- ¹⁰ Pilar Alejos Gutierrez; Manuel Fernández Cánovas. *High Performance Concrete: Requirements for constituent materials and mix proportioning*. ACI Materials Journal. Mayo/ Junio 1996.
- ¹¹ Neville, Adam M. *Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete*. ACI Materials Journal. Enero/ Febrero 1997.
- ¹² Iravani, Said. *Mechanical Properties of High-Performance Concrete*. ACI Materials Journal. Septiembre/ Octubre 1996.
- ¹³ Ferraris, Chiara F.; Lobo, Colin L. *Processing of HPC*. Concrete International. Abril 1998.
- ¹⁴ Clifton, James R., et al. *Outline of a National Plan on High-Performance Concrete*: Report on the NIST/ ACI Workshop. Mayo 1990
- ¹⁵ Khan, Mohammad Shamim; Ayers, Michael E. *Minimum length of curing of silica fume concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering. Mayo 1995.
- ¹⁶ Bentz, Dale P., et al. *Hydration of Portland Cement: the effects of curing conditions*. 10th International Congress on the chemistry of cement. Proceedings Vol.2.
- ¹⁷ Miyazawa, S; Monteiro, P.J. *Volume change of High-Strength Concrete in moist conditions*. Cement and Concrete Research. Abril 1996.
- ¹⁸ Neville, Adam M. *Suggestions of research areas likely to improve concrete*. Concrete International. Mayo 1996.
- ¹⁹ Schmelter, Ulrich. *Hydration of High-Strength Concrete. First results and future projects*. Darmstadt Concrete. 1995.
- ²⁰ Vivekanandam, K.; Patnaikuni, I. *Microcracking in High Performance Concrete during hydration*. Australian Civil Engineering Transactions. Diciembre 1995.
- ²¹ De Larrard, Francois; Schaller, Isabelle; Fuchs, Jacques. *Effect of bar diameter on the bond strength of passive reinforcement in High-Performance Concrete*. ACI Materials Journal. Julio/ Agosto 1993.
- ²² Tan, Kefeng; Gjorv, Odd E. *Performance of Concrete under differen curing conditions*. Cement and Concrete Research. Marzo 1996.
- ²³ Weber, Silvia; Reinhardt, Hans W. *A blend of aggregates to support curing of concrete*. Proceedings of the International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete. 1995.
- ²⁴ Austin, S.A.; et al. *The influence of early curing on the surface permeability and absorption of silica fume concrete*. Third International Conference on the durability of concrete. ACI SP-145. 1994.

- ²⁵ Hilsdork, Hubert K. *Criteria for the duration of curing*. Proceedings of the Adam M. Neville Symposium on Concrete Technology. Junio 1995.
- ²⁶ Lachemi, Mohammed; Aïtcin, Pierre-Claude. *Influence of Ambient and Fresh Concrete Temperatures on the Maximum Temperature and Thermal Gradient in a High Performance Concrete Structure*. ACI Materials Journal. Marzo/ Abril 1997.
- ²⁷ Ferraris, Chiara F. *Alkali-Silica Reaction and High Performance Concrete*. NIST. Agosto 1995.
- ²⁸ Dehuai, W., et al. *Computerized Mix Proportioning for HPC*. Concrete International. Septiembre 1997.
- ²⁹ De Larrard, Francois; Sedran, Thierry. *Computer-Aided Mix Design: Predicting Final Results*. Concrete International. Diciembre 1996.
- ³⁰ Aïtcin, Pierre-Claude. *Durable Concrete –Current Practice and Future Trends*. Concrete Technology. Past, Present and Future. Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium. ACI. Marzo. 1994.
- ³¹ Russell, Michael T. *Inspection and Testing for Quality in HPC*. Concrete International. Quality in Concrete Construction. ACI Spring Convention. 1995
- ³² Russell, Henry G.; et al. *High Strength Concrete: Weighing the Benefits*. Civil Engineering. Noviembre 1989.
- ³³ Aïtcin, Pierre-Claude. *High-Performance Concrete: Review of World Wide Activities*. CANMET/ ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology. Octubre 1992.
- ³⁴ Ozyildirim, Celik. *High-Performance Concrete for Transportation Structures*. Virginia Transportation Research Council.
- ³⁵ Forster, S.W. *The Use of High-Strength/ High-Performance Concrete to Enhance Pavement Performance*. Third CANMET/ ACI International Symposium in Concrete Technology. Agosto 1997.
- ³⁶ Antunes, Manuel L. *Synopsis of The 8th International Symposium on Concrete Roads*. Septiembre 1998.

572707

II. Problemática.

a) Aspectos generales de la problemática en estructuras de concreto por efectos de la durabilidad.

Las fallas más comúnmente encontradas (o atribuidas) en las estructuras de concreto, son debidas a la escasa durabilidad de los materiales de construcción, para este caso el concreto.¹

En la mayoría de las ocasiones, la falta de conocimiento de los materiales de construcción provoca una utilización errónea de los mismos, o su conceptualización y diseño están mal definidos; sin embargo, algunas otras veces la falla se debe primordialmente a que se han tenido los conocimientos suficientes para la especificación de un material correcto, pero la aplicación de los conocimientos se hace de forma deficiente. Este último caso es el más crítico y el que ha traído consecuencias más desastrosas, dado que la suposición de tener la capacidad suficiente para efectuar una recomendación, sugiere la participación en proyectos de cierta relevancia.

Un procedimiento aceptable para la aplicación sistemática exitosa de los conocimientos, es la adopción de la metodología científica de investigación.

Haciendo esa consideración, una actividad inicial sería la observación, que para el presente efecto sería la correcta interpretación del medio ambiente y el servicio que debe prestar una estructura de concreto, además de conocer otros aspectos como la vida de servicio esperada, impacto ecológico, y la implementación del reciclaje. Este análisis debe arrojar ciertos parámetros críticos, los cuales se deben considerar para el estudio y especificación de un material de construcción, que regularmente rigen la selección de un material.

Otro paso sería la documentación objetiva para el caso, para lo cual se debe tener una amplia base teórica de conocimientos acerca del concreto y su comportamiento en las estructuras y ante los diversos parámetros previamente establecidos, donde, además, es fundamental tener una actualización continua y un nexo con el ámbito de investigación y desarrollo de nuevos productos. Mediante la interpretación de la información obtenida y su aplicación al caso, en conjunto con la modelación de los parámetros de diseño encontrados y su relación, se puede hacer un buen concreto ². Por lo tanto, se debe aplicar una visión holística al problema, que se extienda hasta la definición de la tecnología de construcción a emplear, programación del mantenimiento y la medición del efecto ambiental (el cual puede ser positivo).

La interacción de grupos multidisciplinarios le proporcionaría mayor efectividad teórica a las decisiones tomadas. El posterior monitoreo será quien en realidad defina la certeza de las decisiones tomadas.³

Sin embargo, es necesario desarrollar la práctica en la búsqueda y localización de información, constante actualización de conocimientos, implementar estrategias en favor de una investigación y monitoreo en concreto y su desempeño en las estructuras.

b) Caso de Estudio

Para fines de aplicación de las diversas teorías que implica el concreto de alto desempeño, en cuanto a sus características físicas, químicas, económicas y sostenibles, y su posterior comprobación, se seleccionó un caso de estudio.

Este caso de estudio es el ataque que produce el ácido sulfúrico en una planta industrial donde la actividad preponderante es la fabricación de acumuladores para vehículos automotores.

Puesto que el ácido sulfúrico con una densidad de 1.180 (el cual corresponde a una concentración de alrededor del 10%) es una materia prima esencial y un ingrediente activo en los acumuladores, pero su desuso actual o futuro no es factible. Ante tal situación, la empresa ha protegido sus instalaciones con membrana antiácida tanto en muros como en pisos. El presente trabajo se enfocará al efecto en el piso.

El contacto principal del ácido con el piso se produce por el escurrimiento (aunque muy escaso) que se da cuando se está llenando de ácido el casco de los acumuladores, que es una operación semi-manual. Otra forma en que llega el ácido al piso es cuando se evapora, y después se condensa en la cubierta de lámina de la nave, y eventualmente se precipita, simulando una lluvia ácida. Esta última condición da un ambiente extremadamente corrosivo, tanto en estado líquido como gaseoso.

A fin de minimizar el tiempo en que está en contacto el ácido con el piso y su posterior penetración, éste se ha construido con cierta pendiente para acelerar el escurrimiento del ácido hacia un pequeño canal colector en un costado de la nave. La estrategia que ha seguido la empresa para disminuir los efectos nocivos del ácido, es instalar una superficie de loseta de barro cocido, adherida con cemento asfáltico, posteriormente una delgada membrana resistente al ácido, y después una capa de mortero basado en cemento de furán. Sin embargo, la duración efectiva de ésta protección no es muy prolongada.

Además, está prohibido el tránsito de vehículos como los montacargas, entre otros, y sólo se permite el tráfico peatonal de los operarios.

La propuesta es obtener un concreto de alto desempeño resistente a ácidos.

El efecto nocivo del ácido en el concreto, se define principalmente como la lixiviación de la cal libre por efecto de la penetración del ácido, haciendo una matriz cada vez más porosa. Además, la razón de ataque avanza conforme se hace más porosa la matriz de concreto. Otro tipo de degradación que se presenta a veces simultáneamente es por la disolución de los productos de hidratación del cemento por su reacción química con el ácido. La inclusión de agregados ricos en calcio, o carbonatos de calcio, también hace más susceptible de ataque al concreto, dado que su resistencia al ataque químico por ácidos es muy baja.⁴

La mecánica de degradación empieza en la superficie del concreto, con la lixiviación de la cal libre, propiciada por la porosidad que se encuentra en las superficies a causa de los capilares formados por el sangrado y el eventual agrietamiento plástico o por contracción por secado. Una vez que ha logrado penetrar, los productos de lixiviación y reacción más susceptible continúa siendo la cal libre. Se ha encontrado que la reacción del ácido, principalmente con la cal, neutraliza la acción destructora del ácido; sin embargo la neutralización dura hasta cuando se renueva la concentración del ácido.⁵

La siguiente fase de ataque se puede presentar en los productos de hidratación del cemento o C-S-H o en los agregados, según sea su composición mineralógica. La reacción con los C-S-H es una disolución que debilita severamente la integridad física de la pasta y su interfase con los agregados. Cuando un agente agresor, como el ácido, penetra hasta la interfase, la cual es una zona relativamente más porosa que el resto de la matriz,⁶ la razón de degradación aumenta rápidamente, produciéndose una repentina pérdida de adherencia con los agregados, causando la destrucción total del concreto. Además, para el caso del ácido sulfúrico, existe la formación de sulfato de calcio, que reacciona expansivamente causando agrietamiento.⁷ Es importante señalar que la razón de degradación global tiene un comportamiento progresivo, dado que, conforme avanza el ataque, el concreto se hace más poroso, facilitando los canales de penetración.⁷ Este es el comportamiento que se presenta en el concreto normal.

La propuesta del concreto de alto desempeño se basa en las características de baja permeabilidad que presenta, así como la escasa presencia de redes de capilares o de los mismos capilares. Además, la actividad puzolánica consume la cal libre, y los productos de hidratación del cemento ahora son hidratos de

silicato de calcio con una relación calcio/sílice mucho menor,⁴ constituyendo un compuesto de mucha mejor calidad que los C-S-H originales del cemento Portland, en lo que respecta al ataque por ácidos. De esta manera, los compuestos más susceptibles de ataque se han transformado en un compuesto mucho más resistente, a la vez que han creado un producto con una polimerización más alta que adsorbe iones susceptibles de reacción, como los de álcalis y de aluminio, y es más estable en depresiones del pH ^{4.5}. Por otra parte, la resistencia mecánica de la pasta de un concreto de alto desempeño es mucho más resistente a cualquier tipo de agrietamiento, incluyendo los que se puedan causar por las reacciones químicas del ácido con los productos de hidratación o con los agregados.

Una consideración que se hace es que adicionando humos de sílice en un 30% del peso del cemento, se consume totalmente el contenido de cal libre ⁵. Sólo faltaría la selección de un agregado que tuviera una alta resistencia al ataque por ácidos.

Entonces, el ataque del ácido sólo se presentaría en la superficie, con un avance muy lento, y con una penetración mucho más lenta, dada la baja permeabilidad del concreto de alto desempeño. La penetración de un fluido en un mortero de alto desempeño podría durar varios años, y está influenciada principalmente por los poros más pequeños, en el mediano plazo. ⁸

La vida útil del concreto debe ser mayor que el tratamiento actual y su costo debe de ser menor. La expresión en términos económicos se efectuará por medio de un análisis comparativo del costo del ciclo de vida entre las dos opciones.

Para el presente caso de estudio se diseñará un mortero de alto desempeño, por la facilidad para la experimentación, aunque se puede desarrollar fácilmente un concreto con características semejantes. Los parámetros a seguir son: una relación agua/ cemento lo más baja posible; una optimización de la granulometría total de la mezcla con fines reológicos y de disminución de la porosidad final; el menor consumo de aditivo superplastificante a fin de no tener efectos deletéreos tales como segregación, retardo del fraguado, endurecido y ganancia de resistencia; un aumento no deseado de la viscosidad de la mezcla; y una aplicación consciente de los materiales de construcción.

Referencias

- ¹ Metha, P.K. *Durability of Concrete – Fifty years of Progress?*. ACI SP-126-1. 1991.
- ² MacDonald, C.N. *Durability Comparisons of Fiber Reinforced Concrete in Chemical Plant Applications*. ACI SP-126-41. 1991.
- ³ Mullick, A.K. et al. *Performance of Concrete Structures in Industrial Environment*. ACI SP-126-30. 1991.
- ⁴ Neville, Adam M. *Properties of Concrete*. Cuarta y última edición. 1996.
- ⁵ Durning, Timothy; Hicks, María C. *Using Microsilica to Increase Concrete's Resistance to Aggressive Chemicals*. Concrete International. Marzo 1991.
- ⁶ Garboczi, E.J.; Bentz, D.P. *Modelling of the microstructure and transport properties of concrete*. Construction and Building Materials. Vol.10, No.3. 1996.
- ⁷ Banthia, N.; Sheng, J. *Durability of Carbon Fiber Reinforced Cements in Acidic Environments*. ACI SP-126-45. 1991.
- ⁸ Martys, Nicos S.; Ferraris, Chiara F. *Capillary Transport in Mortars and Concrete*. Cement and Concrete Research. Vol. 27, No. 5. 1997.

III. Selección de los Agregados Pétreos.

Considerando la situación de la mecánica de degradación del caso de estudio, es necesaria la inclusión de agregados con una gran resistencia al ácido, que hayan demostrado una buena compatibilidad con el cemento,¹ y su fuente sea cercana y explotable.

De acuerdo con un análisis mineralógico y de localización de bancos, la opción más viable sería el empleo de basalto.

La decisión se tomó en base a su composición mineralógica.

El basalto es una roca ígnea básica efusiva de grano fino, a veces vítrea, de color oscuro, compacta. Los minerales esenciales son una *plagioclasa cálcica* y un *piroxeno*.^{2,3} De acuerdo con un análisis bibliográfico, y con las características que presenta nuestra roca de un grano no tan fino, con una ligera porosidad, y cierto contenido de burbujas, encontramos que la variedad seleccionada tiene como minerales principales alguna *plagioclasa*, *augita*, *hiperstena*, *olivino* y en ocasiones *vidrio*. Los minerales accesorios son la *magnetita*, *ilmenita*, *ágata*, *cuarzo*, *calcita*, *clorita*, *zeolita*.⁴

La *plagioclasa* que es el principal constituyente del basalto, es un *feldespato triclinico*, comúnmente llamado *calcosódico*, que forma una serie isomorfa cuya composición varía desde la *albita* pura, a la *anortita* pura; y estos miembros extremos pueden mezclarse entre sí en cualquier proporción, definiendo una serie de especies. La *plagioclasa* presente en el basalto se encuentra entre una *labradorita* y una *andesina*, aunque la *andesina* pura es una especie muy rara, y sólo se encuentra presente en los granos irregulares de la roca. La clasificación de estas especies se hace de acuerdo a sus contenidos de *albita* y *anortita*.³

Tabla 3.1. Clasificación parcial de la plagioclasa.

	% de Albita	% de Anortita
Andesina	70-50	30-50
Labradorita	50-30	50-70

La composición química de *albita* es un silicato aluminico de sodio (Si_3AlO_8)Na, aunque el potasio puede hallarse a veces presente en cantidades apreciables; mientras que la *anortita* es un silicato

aluminico de calcio ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8$)Ca. El color de estas especies es de incolora a blanco grisáceo, en pocas ocasiones verdoso o marrón. Su brillo característico es de vítreo a aperlado.³

Las características de estos minerales con respecto al ácido son que la *albita* es insoluble en cualquier ácido, mientras que la *anortita* se descompone lentamente sólo en ácido clorhídrico con separación de gel de sílice. Entonces los minerales como la *andesina* y la *labradorita* muestran mayor solubilidad en cuanto mayor sea su contenido de *anortita*. Como un dato interesante añadiremos que a mayor contenido de *anortita*, aumenta el peso específico de la *plagioclasa*.³

La distinción cuantitativa entre la *andesina* y la *labradorita* sólo se puede efectuar mediante difracción de rayos X, o medios ópticos.³

El otro mineral principal del basalto es un *piroxeno*, que para nuestra variedad de basalto es una *augita*.⁴ El grupo de los piroxenos está formado por especies con altos contenidos de silicatos². La formulación química de la *augita* es $\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$, y su color es casi negro.² La *augita* se produce por el enfriamiento lento de la pigeonita. Es insoluble a los ácidos.³

El otro mineral principal en el basalto es el *olivino*.⁴ El *olivino* es de color verde oliva a grisáceo pardo, y su composición se expresa en una serie completa que va desde la *forsterita* $(\text{SiO}_4)\text{Mg}_2$ hasta la *fayalita* $(\text{SiO}_4)\text{Fe}_2$.³ Para nuestra roca la especie es *crisolita*^{2,4}, que se compone de un 10% a un 30% de *fayalita*, y el resto de *forsterita*.³ Es lentamente soluble al ácido clorhídrico y con producción de sílice gelatinosa al evaporar.³

Para una mejor apreciación de la estructura y posible detección de minerales de la variedad del basalto obtenido, se realizó un análisis morfológico por medio de un microscopio electrónico de barrido (imágenes 3.3, 3.4, 3.5, 3.6), encontrando algunas cantidades pequeñas de calcita, huecos de gran tamaño, pero después de un extenso barrido, no se encontraron grietas ni una cantidad considerable de microporos.

La localización del banco se encuentra a 20 Km. al sur de Sabinas, Coahuila. De acuerdo a un análisis realizado en la carta geológica G14A23 correspondiente al área⁵, impresa por el INEGI, la extensión del banco es de una área cercana a las 22,000 Has., con una profundidad hasta de 4 metros⁵, donde se encuentran rocas de diversos tamaños, desde unos cuantos centímetros cúbicos hasta de unos pocos metros cúbicos, pero predomina el tamaño de 4000cm^3 a 10000cm^3 (Imagen 3.1, y 3.2)

Las rocas de basalto se encuentran desde la superficie hasta una profundidad media de 4.00 m, empacados con aluvión. Este estrato de material se encuentra sobre un estrato de conglomerado de unos cuantos metros, que a su vez se encuentra sobre un estrato de lutita y arenisca mucho más grueso.⁵ En la zona se encuentran 5 aparatos volcánicos, sobresaliendo un pequeño volcán que se eleva a unos 400m sobre la superficie⁵, al cual los pobladores le llaman de cariño Kakanapo.

De acuerdo con un sondeo informal efectuado en el área, actualmente no existe explotación comercial en la zona del basalto como agregado, o como material de construcción.

Imagen 3.1. Roca de basalto de medianas dimensiones.

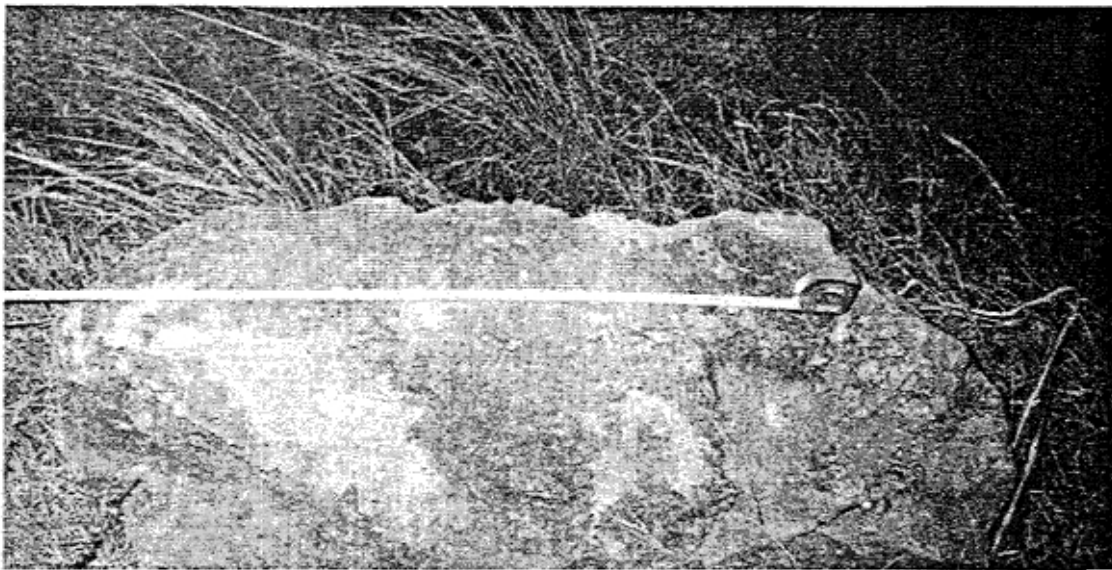


Imagen 3.2. Distribución típica del banco de rocas de basalto.

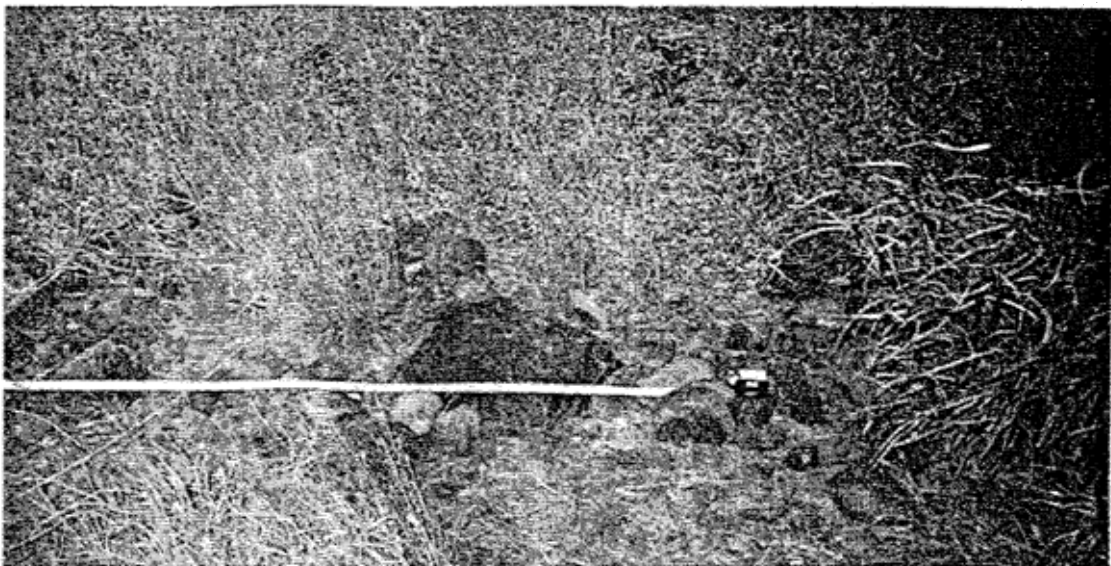


Imagen 3.3. Estructura del basalto. Se aprecian huecos de gran tamaño y calcita en algunos de ellos. El resto de la matriz se observa bastante densa.

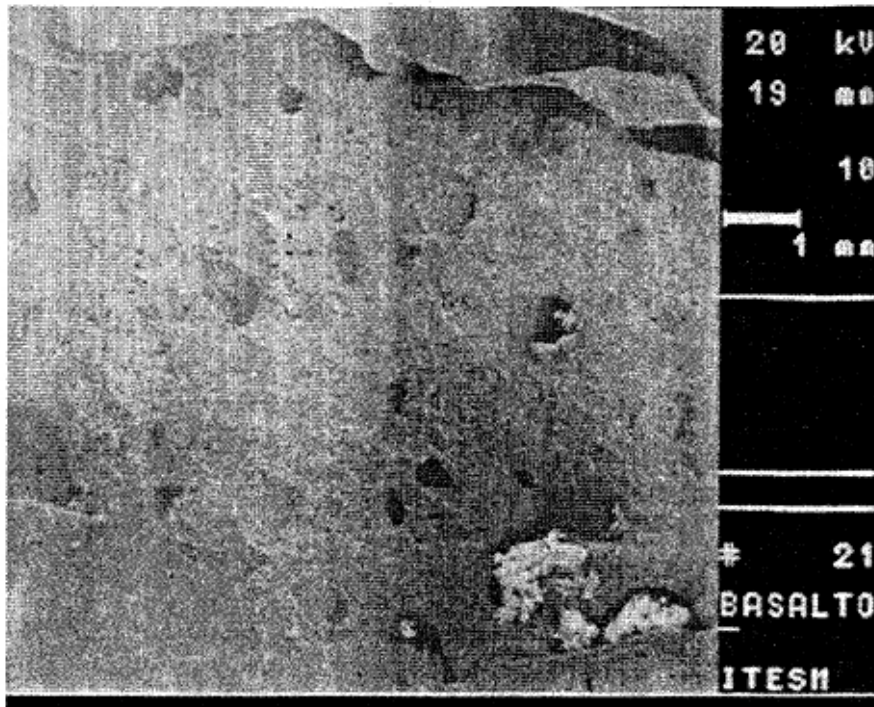


Imagen 3.4. Calcita incrustada en huecos. No se observa cantidad considerable de microporos.

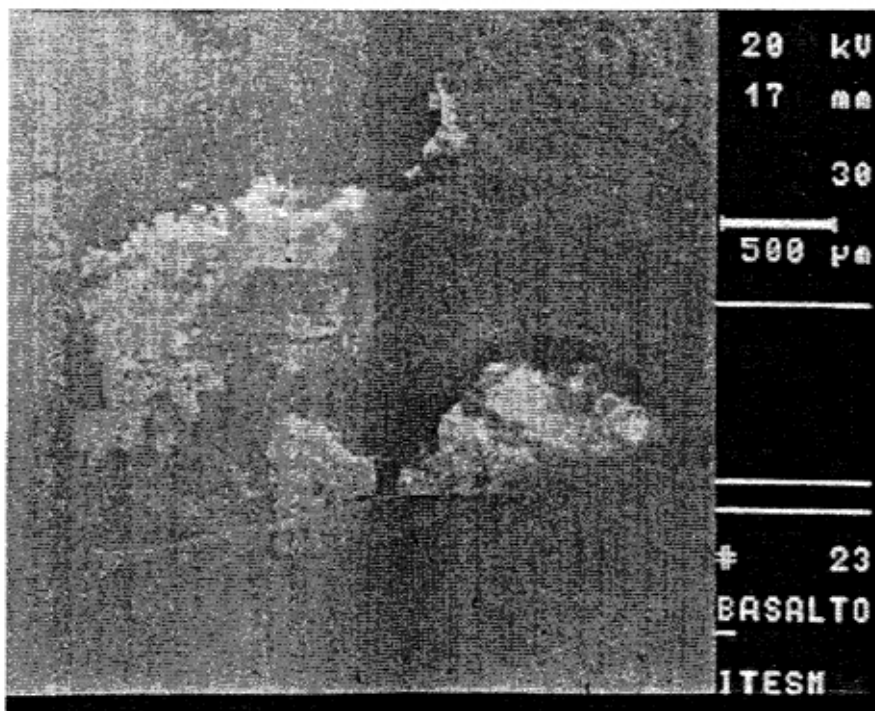


Imagen 3.5. Densidad del basalto. Formaciones masivas, sin grietas apreciables.

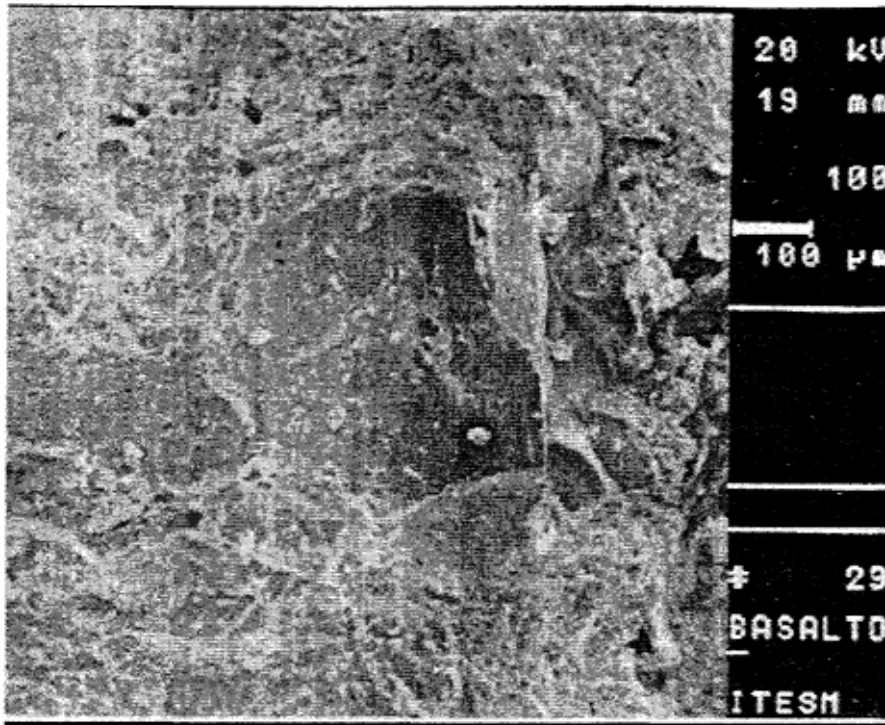
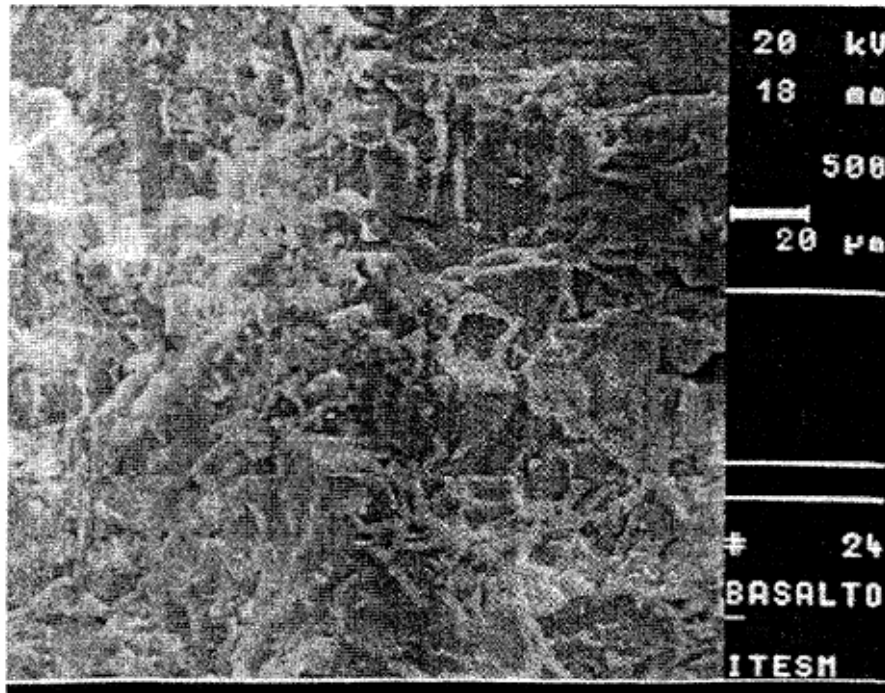


Imagen 3.6. Microestructura del basalto. Matriz con elevado contenido de sílice.



Referencias

- ¹ Neville, Adam M. *Properties of Concrete*. Cuarta y última edición. 1996.
- ² Whitten, D.G.A.; Brooks, J.R.V. *Diccionario de Geología*. 1980.
- ³ Dana, James Dwight. *Manual de Mineralogía de Dana*.
- ⁴ Bauer, Joroslav. *Guía Básica de los Minerales*. 1981.
- ⁵ Mapoteca del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; Delegación Nuevo León. *Carta Geológica G14A23*.

IV. Consideraciones sobre el humo de sílice.

Como ya se mencionó en el capítulo II, el empleo de la microsilica beneficiaría el comportamiento del concreto de alto desempeño que se quiere diseñar.

La microsilice también conocida como humos de sílice, o humos de sílice densificados, es un material con una alto índice de actividad puzolánica (~210%). Se obtiene como un subproducto de la industria de fabricación de colados de metal de silicón (ferrocromo, ferromanganeso, ferromagnesio) y de ferrosilicón, mediante la reducción de cuarzo de alta pureza y carbón de uso metalúrgico, en un horno de arco eléctrico. El gas de escape es óxido de silicio (SiO), el cual se oxigena en los colectores, condensándose en esferas muy finas y formando SiO_2 , que posteriormente se precipita.^{1,2}

Cuando la microsilica es de un color claro, proviene de un horno con un sistema de recuperación de calor que permite quemar totalmente el carbón, por lo que las emanaciones de gas son más claras; si la microsilice es de un color oscuro es porque el recuperador de calor del horno no es muy eficiente y permite el escape de algo de carbón, que da la tonalidad oscura. Dado que un horno puede producir coladas diferentes de ferrosilicón o metal de silicón, es conveniente saber que tipo de colada de metal es el humo de sílice, puesto que el contenido de SiO_2 varía significativamente. Para un metal de silicón el contenido de SiO_2 es cercano al 95%; para un metal de ferrosilicón al 75% es de 90%; y para un ferrosilicón al 50% es de 84%.^{1,2}

La disponibilidad de los humos de sílice para su empleo en mezclas de concreto, se da en forma de pequeños aglomerados de partículas, o en suspensión basada en agua. Estas presentaciones son con la finalidad de mejorar su manejo, tanto en el proceso de mezclado como en su industrialización, ya que en su forma original de microesferas, se complica demasiado, puesto que son partículas muy volátiles, y con un peso volumétrico sumamente bajo, lo que afectaría su costo de transportación, que es el principal factor económico de análisis de los materiales de construcción.¹

Por su tamaño tan pequeño (de 0.03 a $0.3\mu\text{m}$), los humos de sílice actúan como un relleno microscópico entre los granos de cemento, y en la zona de transición entre los granos de la pasta y los agregados; además, por su composición química desarrolla una reacción puzolánica con el hidróxido de calcio cuando existe humedad,² produciendo un mayor volumen de gel de hidratos de silicato de calcio, con una relación calcio/sílice más baja ¹. Esta actividad puzolánica contribuye a una reducción drástica de los poros capilares que normalmente se formarían en el proceso de hidratación. ³

La cinética de reacción puzolánica, comienza con el acomodo de las partículas de humo de sílice entre los granos de cemento, actuando primeramente como un relleno, y después como un sitio de nucleación de los granos de hidróxido de calcio, producto de la hidratación temprana del cemento.¹ Entonces empieza la reacción más intensa del cemento por medio de su hidratación, y más lentamente la reacción puzolánica, la cual consume la parte correspondiente de cal libre, la que reacciona por disolución creando un poro en su lugar original.³

El grado de hidratación final de las mezclas con humos de sílice suele ser algo menor (cerca a solo el 90%) del de una mezcla solo con cemento Portland Tipo I. Esta condición se presenta ciertamente, en primera instancia por la reducción progresiva de la porosidad en las primeras edades por efecto del humo de sílice, y posteriormente por la generación de gel por la reacción puzolánica, que tiene una porosidad menor que el hidróxido de calcio; estas condiciones normalmente reducen la permeabilidad, y por lo tanto los conductos de hidratación se ven restringidos. Además se ha observado que no existe un incremento sustancial en la hidratación (en términos de cemento sin hidratar) entre los 7 y 28 días en sistemas con humos de sílice, aún en mezclas con moderados contenidos de agua.³ Otro factor que contribuye a una hidratación incompleta, es la desecación que se produce a edades tempranas por la gran cantidad de reacciones químicas tanto del cemento como puzolánicas que requieren de agua, y esta se consume rápidamente.¹

El consumo del hidróxido de calcio depende principalmente de la cantidad presente de humos de sílice en la mezcla; la distribución del consumo en el tiempo (o un decremento en la cantidad total de cal libre) señala un incremento sustancial en a partir de los 7 días en sistemas con contenidos mayores al 15%.³

Mientras que los cristales de cal aumentan con el tiempo (por medio de una continua hidratación) en cantidad y tamaño (a expensas de los cristales más pequeños), en un sistema con humos de sílice disminuyen en tamaño y cantidad por la disolución (total o parcial) que sufren para aportar iones de calcio para la reacción puzolánica; entonces si la reacción puzolánica se lleva a cabo en un lugar apartado (obviamente en escala microscópica), se forma un poro en el lugar por la migración de los iones. Cabe señalar que los cristales más grandes de hidróxido de calcio se concentran en el área de la pasta, y los más pequeños en la zona de la interfase; esto por la mayor concentración, por su tamaño, de granos de cemento en la pasta que en la interfase, donde se acumulan más partículas de humos de sílice. Aún con esta última nota, se ha observado el incremento en la producción de poros con una área mayor a $16 \mu\text{m}^2$ predominantemente en regiones cercanas a los agregados. Si estos poros se producen en una cantidad

considerable, y si existe también una cantidad considerable de agregados en el concreto, probablemente existirá una zona bastante grande de percolación en la interfase, que ocasionalmente puede generalizarse a toda la masa de concreto, produciendo una red de poros que harían susceptible al concreto del ingreso de iones deletéreos. Aún bajo estas condiciones, un concreto con una cantidad moderada de humos de sílice es mucho menos permeable que un concreto normal.³

Considerando el aspecto de la disolución del hidróxido de calcio y su efecto en la porosidad, se ha definido que podría existir una relación óptima (en función de la porosidad por el efecto antes mencionado) de contenido de sílice, además que las condiciones de mezclado, temperatura y curado tienen un impacto considerable en el comportamiento del concreto. También la morfología de los cristales de hidróxido de calcio juega un papel obviamente importante.³

Aún así, el concreto con humos de sílice ha tenido un buen desempeño históricamente, en referencia con un concreto normal. Aunque no existe información abundante en cuanto al comportamiento en el largo plazo de sistemas con humos de sílice, dado que su uso en el campo se empezó a presentar en la década de los ochenta, en aplicaciones donde se aplican sales deshielantes y existen continuos ciclos de congelamiento-descongelamiento, donde los iones de cloro y el microagrietamiento por los cambios de temperatura causan daños severos al concreto normal, ha tenido un desempeño muy aceptable, aún y cuando la tecnología del concreto de alto desempeño no estaba desarrollada.⁴

Dentro de las características principales de una mezcla de concreto con microsíllice, con respecto a mezclas normales con cemento Portland como cementante, se puede resumir lo siguiente:

- Incremento sustancial en la resistencia del concreto endurecido. Este incremento en la resistencia se basa en el efecto de los humos de sílice en la zona de transición de los agregados, ya que produce una zona más densa y homogénea, la cual se ha estudiado extensamente por medio de microscopía electrónica y óptica, y pruebas de microdureza.³
- Reducción significativa en la permeabilidad, aunque el contenido de aire se mantiene casi constante. La permeabilidad tiene un valor óptimo para una proporción y graduación de los agregados, con un volumen dado de humos de sílice.⁵
- La trabajabilidad de la mezcla se ve afectada adversamente, principalmente por un mejor acomodo de las partículas más finas, y un aumento en el área superficial global de las partículas, por lo que generalmente se necesita incrementar la cantidad de superplastificantes, que incrementan la permeabilidad a iones para concretos con bajos

contenidos de humos de sílice, minimizándose este efecto para cantidades mayores al 20% del cementante.⁵

- Dada la cantidad de agua requerida para las reacciones químicas y la consecuente desecación, los sistemas con humos de sílice prácticamente no producen sangrado (claro que con contenidos de agua de moderados a bajos), creando un concreto con superficies más densas y con un comportamiento mucho mejor a la abrasión.¹ Sin embargo, la falta de sangrado puede ocasionar contracción plástica si no se toman las medidas preventivas correspondientes.^{1,5}
- Puesto que el humo de sílice tiene un pH bajo (aprox. 5.5 en la forma de suspensión) respecto al de una pasta de cemento normal (pH ~13), reduce la alcalinidad total de la mezcla, sin embargo su efecto no es muy drástico, bajando solo un punto para un contenido de 20% de humos de sílice, por lo que la protección, por parte del concreto, contra la corrosión del acero no se ve afectada en términos de un decremento en la alcalinidad.¹ Inclusive se le ha denominado como un muy buen material protector para evitar la corrosión del acero de refuerzo,⁶ inclusive en agua de mar (en proporciones mayores al 10%, y bajo un curado inicial continuo de por lo menos 7 días).⁷ Su efecto se considera mucho mejor que reducir drásticamente la relación agua-cemento en concretos normales.⁶ Puesto que el mecanismo principal de corrosión del acero de refuerzo es la celda galvánica, la alta resistividad eléctrica de los sistemas con humos de sílice es un factor de mucha influencia en la protección contra la corrosión.² Inclusive su utilización en reparaciones y rehabilitaciones de miembros estructurales dañados por la corrosión del acero de refuerzo ha sido exitosa, sobrepasando las expectativas.⁸

Por lo tanto, por el intenso consumo que se presenta de cristales de hidróxido de calcio, el empleo de los humos de sílice para nuestro caso es imperativo. Sin embargo, se debe prestar especial atención al efecto que pudiera causar en el pH de la matriz de concreto, puesto que el ataque se producirá en un medio extremadamente ácido. Por otra parte, se tendrá atención al efecto del curado en la hidratación del cemento, y sobre todo en la generación de capilares, puesto que una masa permeable sería una solución muy pobre para la problemática presentada.

Una de las grandes ventajas con el uso de humos de sílice, es el efecto que produce en la relación calcio/sílice de los productos e hidratación del cemento; el incremento del factor sílice dará un producto mucho más resistente al ácido en cuanto más baja sea esta relación.

Referencias

- ¹ Neville, Adam M. *Properties of Concrete*. Edición Cuarta y Final. 1997.
- ² Wolsiefer, John T. *Silica Fume Concrete: a Solution to Steel Reinforcement Corrosion in Concrete*. ACI SP 126-28. 1991.
- ³ Bentz, Dale P.; Stutzman, Paul E. *Evolution of porosity and calcium hydroxide in laboratory concretes containing silica fume*. BFRL, NIST. 1995.
- ⁴ Lachemi, M. et al. *Long-Term Performance of silica fume concretes*. Concrete International. Enero 1998.
- ⁵ Bayasi, Ziad; Zhou, Jing. *Properties of silica fume concrete and mortar*. ACI Materials Journal. Julio-Agosto 1993.
- ⁶ Anqui, L. et al. *Study on Corrosion Prevention in reinforced concrete containing condensed silica fume and its application*. ACI SP 126-26. 1991.
- ⁷ Paillere, A.M. et al. *Influence of curing time on behaviour in seawater of high strength mortar with silica fume*. ACI SP 126-29. 1991.
- ⁸ Wolsiefer, John T., Clear, Kenneth C. *Long term durability of silica fume structural concrete, shotcrete, grout, slab overlays and patches*. Durabilidad del Concreto. UANL. 1993.

V. Consideraciones sobre los aditivos superplastificantes.

Para lograr una consistencia del concreto con bajos contenidos de agua, es necesario el empleo de un aditivo reductor de agua de alto rango (superplastificante).

La utilización propia de los aditivos, en conjunto la tecnología del concreto desarrollada hasta el presente, que no provee del concreto de alto desempeño, ha tenido aplicaciones verdaderamente exitosas en grandes proyectos de construcción, donde el concreto juega un papel muy importante, como en plataformas marinas, estacionamientos en zonas geográficas con presencia constante de ciclos de congelamiento-descongelamiento, rascacielos, y construcción fast-track de pisos industriales y pavimentos¹.

El origen de los diversos aditivos siempre ha sido casual. El efecto del retardo de los tiempos de fraguado se notó cuando se acarreaban agregados en costales que previamente habían contenido azúcar, y posteriormente se constató que era el azúcar quien originaba el retardo. La inclusión de aire se produjo inconscientemente en EU durante la construcción de una carretera, cuando se empleó un dispersante de color para diferenciar los carriles: la mezcla fue más trabajable por la creación de microburbujas de aire por el dispersante, y resistió más la congelación y deshielo.^{2, 3}

Como la industria de los aditivos tuvo estos inicios que podríamos llamar fortuitos, generalmente se cree que los aditivos químicos son más bien el producto de la alquimia, que el de una buena aplicación de las ciencias químicas. Y esta creencia se pronuncia cuando su modo de acción en las mezclas de concreto para la generación de sus determinados efectos, algunas veces no se encuentra muy clara en términos científicos.³

Las diversas clasificaciones que se hacen de los aditivos son por su efecto físico, o físico-químico en el concreto, lo que facilitaría su selección por el consumidor, pero cuando estas clasificaciones son tan amplias, generalmente lo que hacen es generar confusión, principalmente por el doble efecto que puede tener un mismo aditivo.

La causa principal del auge de los aditivos es que se le atribuyen prestaciones por encima de las que en realidad le brinda al concreto, generalmente sobre el efecto de la durabilidad.⁴ Un caso es cuando se recomienda el empleo de aditivos inclusores de aire como la solución más eficiente para el concreto que estará expuesto a ciclos de congelación y deshielo, sin embargo no se precisa si podrá soportar

temperaturas de -10°C , o de -50°C , o tal vez de -100°C , ni por cuanto tiempo o cuantos ciclos. Lo mismo sucede con los superplastificantes, a quienes se le atribuye incrementar la durabilidad del concreto; entonces bastaría adicionar aditivo a una mezcla pobremente diseñada para que sea durable. Indudablemente que los aditivos por sí mismos no producen maravillas, sino que en combinación con un diseño y selección eficiente de los demás componentes del concreto, seguramente nos dará un resultado de muy alto nivel, como lo es el concreto de alto desempeño ⁵.

Sin embargo, los superplastificantes si han tenido un desarrollo bastante científico. Generalmente existen cuatro categorías:

1. Formaldehído condensado sulfonatado de naftalina.
2. Formaldehído condensado sulfonatado de melamina.
3. Lignosulfonato modificado.
4. Esteres carbohidratados ó esterres ácido sulfónicos.

Los superplastificantes son polímeros orgánicos sintetizados solubles al agua, que se fabrican por un complejo proceso de polimeración, para lograr moléculas de cadena larga, y también de alto peso molecular, que es el factor que incrementa su eficiencia. ^{2,3}

La acción del superplastificante se puede resumir como la adsorción de las moléculas de aditivo en la superficie de las partículas de cemento, cargándolas negativamente, por lo que se mantienen en repulsión constante, dispersándose, evitando la floculación. De esta manera, el agua que anteriormente se tomaban los flóculos de cemento, ahora está libre y se emplea para lubricar las partículas de todos tamaños, y crear una masa más fluida, que facilita su acomodo, densificándose, y también se produce una mejor hidratación del cemento. ^{2,3}

Además, su efecto en el aspecto químico, se produce por la reacción de sus fases sulfonadas con el C_3A del cemento, generalmente por moléculas cortas de polinaftaleno.³ Por lo tanto un aditivo tendrá un comportamiento diferente para cada cemento, puesto que la composición química del cemento tiene una variabilidad para cada planta cementera por los procesos industriales, y los cambios en los bancos de materia prima. A esto se le ha llamado compatibilidad cemento-aditivo.

Comúnmente existe una pérdida de la trabajabilidad del concreto, hasta cierto punto rápida, sobre todo en concreto de baja relación agua-cemento. Esta condición se presenta, dado que existe muy poca

agua para que la anhidrita (o los componentes que son fuente de sulfato de calcio) se disuelva rápidamente, y puedan neutralizar al C_3A . Por otra parte, la pérdida de la trabajabilidad también se presenta por el rápido consumo de agua para la formación de etringita. Otro aspecto que también ocurre es la interferencia del aditivo en la solubilidad de las fuentes de sulfato de calcio.⁶ Además, otro factor causante de la pérdida de rápida del efecto del superplastificante, es un mezclado excesivo del concreto, ya que las partículas del cemento al estar en constante agitación, se rozan unas con otras, produciendo un rasgado en la superficie de la partícula de cemento que está cubierta por el aditivo, exponiendo el cemento al agua presente en la mezcla, propiciando su hidratación³.

Entonces la situación expresada anteriormente puede ser corregida eficientemente por la detección del efecto de incompatibilidad, principalmente haciendo modificaciones en la solubilidad del sulfato de calcio, o considerando otra composición de aditivos, o una combinación de varios aditivos, como ya se ha realizado⁷, lo cual lleva a establecer una probable compatibilidad que debe ser probada en laboratorio. En cualquier caso, considerando el tipo de evaluación más eficiente con respecto a sus efectos reológicos, dado que los parámetros del concreto fresco siguen el comportamiento de un fluido Bingham, por lo cual la aplicación de una prueba efectiva de medición de la trabajabilidad, tanto en el laboratorio como en campo, podría ser una prueba de revenimiento modificada, cuya aplicación podría ser incluso para control de calidad, como ya se ha estudiado con detalle.

Como se puede observar, el desarrollo del análisis de la compatibilidad cemento-aditivo se encuentra en sus primeras edades, por lo que lograr un aditivo que sea compatible con todos los cementos, o que su uso pueda efectuarse sin la necesidad de pequeñas pruebas (que pueden consumir bastante tiempo, para lograr la ubicación y dosificación del aditivo más eficiente para un cemento dado). Considero de manera muy personal, que los fabricantes de cemento como de aditivo debieran realizar las recomendaciones al consumidor en cuanto a la compatibilidad de su producto con otros, para maximizar eficiencia de los materiales, en beneficio de una mejor aplicación de los recursos, e indudablemente de una mayor satisfacción en el consumidor.

El comportamiento que esperamos en nuestra investigación por parte del aditivo, es el de dispersar las partículas de cemento, a tal grado de obtener una trabajabilidad adecuada, pero lo que más se espera es que tal dispersión sea la necesaria para que por la defloculación, el acomodo de las partículas de humo de sílice sea más homogéneo, y la actividad puzolánica se efectúe de una manera más rápida y uniforme. Asimismo, el efecto que pueda tener sobre la distribución de los agregados en el mortero, en

función de la viscosidad que genera, sea tal que coadyuve a una mejor compactación del mortero *-per se-*, incrementando la densidad, y disminuyendo la permeabilidad de forma global.

Por las consideraciones teóricas anteriormente expuestas, sería necesario encontrar una combinación de aditivo-cemento compatible; sin embargo, no es menester de la presente investigación hacerlo, puesto que sería un proceso con un consumo de tiempo considerable, por lo que se empleará alguna opción que ya se haya utilizado sin comportamiento objetable.

Referencias

- ¹ Phelan, William. *Admixtures and HPC: a happy marriage*. Concrete International. Abril 1998.
- ² Neville, Adam M. *Properties of Concrete*. Edición Cuarta y Última. 1996.
- ³ Aïtcin, Pierre-Calude; Baalbaki, M. *Concrete admixtures –Key components of modern concrete*. Concrete Technology: New Trends, Industrial Applications. RILEM. 1995.
- ⁴ Rivera, Raymundo. *Función de los aditivos en la durabilidad del concreto*. Durabilidad del Concreto. UANL. 1993.
- ⁵ Gagné, Richard; Aïtcin, Pierre-Claude. *Superplasticizers for durable concrete*. Durabilidad del Concreto. UANL. 1993.
- ⁶ Kalil, S.M; Ward, M.A. *Efecto del contenido de sulfato en el cemento, sobre la pérdida de revenimiento en Twenty-two points, plus triple-word-score, plus fifty points for using all my letters. Game's over. I'm outta here.concretos que contienen reductores de agua de gran eficiencia (superplastificantes)*. UANL. 1979.
- ⁷ Jolicoeur, Carmel, et al. *The chemistry of concrete superplasticizers: rheology and hidration kinetics of portland cement pastes containing mixtures of naphtalene and melamine-based superplasticizers*. Durabilidad del Concreto. UANL. 1993.

VI. Definición Granulométrica.

Considerando la función de los agregados en una mezcla del concreto, y en especial para la mezcla que se desea diseñar, es necesario efectuar un intenso análisis del esqueleto de todas las partículas en seco en la mezcla, a fin de reducir la cantidad inicial de huecos, y lograr un mejor acomodo, para minimizar la porosidad, que es un factor dominante en la durabilidad y en la mecánica de degradación.

Dado que la granulometría del cemento y de los humos de sílice se da en la planta productora, y por su tamaño sería difícil optimizarla para un fin dado, es más factible optimizar la granulometría de los agregados.

Asumiendo la teoría que la pasta de cemento en estado fresco, contribuye a lubricar por sí misma a los agregados para que tengan un desplazamiento más suave en la mezcla y se logren acomodar mejor, además de rellenar los huecos que quedan y lograr así su función cementante. Sin embargo, el espesor de la pasta de cemento (entre otras características físicas, como su módulo de elasticidad) es un parámetro que influye en la resistencia a la compresión del cemento. Entonces la reducción del contenido de pasta no solo se debe optimizar por aspectos puramente económicos. Por lo tanto, si una de sus funciones es mejorar la trabajabilidad, donde la distribución del tamaño de los agregados juega un papel importante, entonces si mejoramos el diseño de la granulometría de los agregados a que logren su máxima compacidad (en estado seco), se contribuiría a disminuir el consumo de pasta, y con seguridad se tendría una matriz menos porosa y permeable, considerando que los agregados tienen una buena impermeabilidad, como para nuestro caso, que es un basalto con una microestructura extremadamente cerrada. A esta propiedad del agregado para acomodarse de tal manera que tienda a tener una densidad y porosidad semejantes a las de su roca original, se denomina su grado de compacidad, que se define como la relación entre su peso volumétrico suelto y su densidad. Ante lo cual, cada distinta granulometría tendría un grado de compacidad diferente, lo que permite encontrar una proporción óptima. Obviamente, los superplastificantes, el contenido total de agua, y la relación agua-cemento también tienen un impacto muy fuerte en la trabajabilidad, principalmente por la viscosidad que se genera, además de la influencia de la relación agua-cemento en el esfuerzo cortante que se necesita para el desplazamiento de la masa de concreto.

La optimización acerca del esfuerzo cortante y la viscosidad, en conjunto con una optimización de los agregados, que aunque no tan precisa como un estudio de compacidad de los agregados, ha dado pie para la obtención del concreto autocompactable (o fluido) de alto desempeño, cuyo desarrollo y aplicación

se ha intensificado en Japón ¹, propiciado por encontrar una solución para tener un concreto de mayor durabilidad, y menor consumo de energía y mano de obra para su fabricación y colocación, aún en estructuras esbeltas y/o altamente congestionadas por el acero de refuerzo.

El estudio y la aplicación de las diferentes teorías de la compacidad de las partículas, han sido exitosos en otros campos de la industria y de la ciencia, generalmente en aquellas áreas donde se desea optimizar volúmenes de material para su transportación.² Aunque los diversos modelos desarrollados, entre sus consideraciones teóricas, asumen circunstancias que difieren mucho de las reales, como el hecho de que las partículas son perfectamente esféricas, y que su tamaño permanece constante (esto es, que el tamaño del material que se retiene entre dos mallas, es el mismo para tales partículas), su empleo ha dado resultados bastante aceptables, a la vez que muy similares y uniformes para cada teoría.

Puesto que la aplicación de la técnica expuesta en diversas teorías involucra un arduo trabajo de laboratorio, a la vez que iterativo, suele hacerse una labor muy pesada. Ante tal situación, para la presente investigación y de acuerdo a los resultados que ya han obtenido en otras investigaciones, se ha decidido adoptar el Modelo de Suspensión de Sólidos, desarrollado por Thierry Sedran y Francois de Larrard, en el Laboratorio Central de Puentes y Caminos, de Francia. Este modelo ha sido utilizado en diseño de mezclas de concreto de alto desempeño, concreto compactado con rodillos, y el desarrollo del concreto reactivo, con resultados dramáticamente satisfactorios³.

Este modelo se basa parcialmente en un modelo desarrollado en 1951, para predecir la viscosidad de suspensiones de partículas, el cual se ha calibrado ⁴, dado que por su concepción original, es una función lineal entre la proporción de los agregados y la densidad de su grado de compacidad, dando una curva angular en la zona de máxima optimización, que es una situación que no aparece en la práctica, donde a cambio de dicha teoría se presenta una curva redondeada en dicha zona.

Además, el Modelo de Suspensión de Sólidos, considera el llamado efecto pared producido en la superficie de los agregados por concepto de la aglomeración alrededor de las demás partículas, que contribuye a la presencia de porosidad en esa zona. Por otra parte también se considera el efecto que se produce cuando una partícula fina se encuentra rodeada por otras más gruesas, que si bien rellena el hueco que se presenta, deja huecos más grandes que los que produciría una partícula más gruesa en su lugar, y da lugar a una zona débil, que en algunos casos podría hacer que se pierda la compacidad del agregado más grueso, produciendo un efecto de aflojamiento.

El modelo consiste en un sistema de ecuaciones, cuyo resultado además de la densidad de compactación, es la viscosidad, dado que a una compactación más eficiente corresponde una viscosidad con un valor más alto. Para nuestro interés, sólo compete la densidad de compactación, que se desea sea lo más alto posible. Las fórmulas en unidades del Sistema Internacional, son:

$$\beta_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} - \frac{2.5}{\ln(\eta_{ref,i})}} \quad (6.1)$$

$$a_i = \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + \beta_i \frac{d_j}{d_i} \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j \quad (6.2)$$

$$b_i = \sum_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{\beta_i}{\beta_j} \sqrt{\frac{d_j}{d_i}} \right) y_j \quad (6.3)$$

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - a_i - b_i} \quad (6.4)$$

$$\eta_{ref,M} = \exp \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{2.5 y_i}{C - \frac{1}{\gamma_i}} \right) \right] \quad (6.5)$$

Donde:

y_i = el volumen de i -partículas dividido por el volumen de sólidos totales

α_i = la densidad de compactación experimental de i -partículas, compactadas separadamente

$\eta_{ref,i}$ = la viscosidad relativa de referencia de i -partículas, compactadas separadamente

$\eta_{ref,M}$ = es la viscosidad relativa de referencia de la mezcla

β_i = es la densidad de compactación virtual

C = es la densidad de compactación

Obviamente la densidad de compactación experimental debería determinarse para cada tamaño de partícula, sin embargo la misma teoría del modelo permite establecer un valor experimental para toda la mezcla de agregados.

Para la obtención de los valores experimentales, la teoría establece procedimientos bien definidos, tanto para los agregados, como el cemento y los humos de sílice, además de los valores de viscosidad relativa de referencia.

Al implementar las fórmulas en una hoja de cálculo, y por sucesivas iteraciones, se obtuvo el valor de densidad de compactación máximo para todos los materiales, en estado seco.

Lamentablemente no se tuvo disponible toda la información relativa a la distribución de partículas del cemento, ni de los humos de sílice; sin embargo se considera que los beneficios del modelo tienen una influencia más relevante para el diseño de la granulometría.

Por lo tanto, la granulometría óptima sería aquella que diera la máxima densidad de compactación, y cuya información se presentará posteriormente.

Sin embargo, se debe recordar que en la teoría y aplicación del modelo en el diseño de la mezcla de la granulometría se considera a todas las partículas en estado seco, y aunque es un diseño más preciso de acuerdo a nuestras necesidades que emplear las especificaciones de las normas vigentes referentes a propiedades y límites granulométricos, aún competen más las características del mortero ya endurecido, y se debería de referir adicionalmente a la porosidad del material precisamente en estado endurecido, por lo que la proporción (más no la graduación) de los ingredientes se va a ver definida por la porosidad final del mortero, calculada por la fórmula:

$$\Pi_M = (0.23 v_w + v_a) / 1-g \quad (6.6)$$

donde:

g = volumen parcial de agregados

v_w = volumen parcial de agua

v_a = volumen parcial de aire

Π_M = porosidad final de la matriz

Obviamente muchos otros factores influyen en el éxito de la implantación de esta teoría, tales como la eficiencia del mezclado, la dispersión de las partículas en la mezcla, la consolidación del mortero, el curado, y el efecto polimerizador en combinación de los humos de sílice y el superplastificante, que podría contribuir a una impropia homogeneización de las partículas por una rápida nucleación para el

cemento, y modificaría la distribución teórica del tamaño del cemento; y sobre todo, que el aumento en la viscosidad propio del mortero de alto desempeño tenga un efecto nocivo para la homogeneidad de la mezcla, al dificultar el desplazamiento interno de los ingredientes, dado que normalmente el movimiento cede cuando ha cesado la fuerza que lo impulsó.

Definitivamente, que el efecto de la fórmula para el cálculo de la porosidad final de la matriz, tendría severas limitantes, puesto que en su base teórica considera la contracción volumétrica que sufre el volumen del cemento, con respecto a la cantidad de agua consumida para su hidratación, y el volumen final del producto de hidratación. Sin embargo, no considera el cambio volumétrico por la maduración del producto de hidratación, el efecto que tienen los cambios en la distribución granulométrica del cemento (que debe ser distinta para cada planta cementera, esto es, para cada instalación que muele el cemento), además el efecto de nucleación que produce el humo de sílice para la reacción del cemento, modifica el área de la partícula y su cinética de hidratación; por otra parte, su contracción a través del tiempo no se encuentra bien definida.

Otro punto a considerar sería la cinética de hidratación de las partículas de cemento, puesto que por su tamaño, presentan diferencias con respecto al tiempo en la elaboración de productos de hidratación⁵, los cuales en principio se desarrollan en su superficie de manera relativamente rápida; sin embargo, la reacción más lenta que se forma en su interior es la de mejores propiedades físicas y químicas, y en algunos casos no existe el agua disponible para su desarrollo, la cual también sería consumida por el efecto puzolánico, y dada la escasez de capilares, no puede llegar del exterior, por lo que desde un punto de vista de la microestructura, esta masa sería heterogénea, con material susceptible de tener una reacción diferida, o de ser acarreado y dejar un poro en su lugar.

Sin embargo, es la fórmula más ampliamente usada que brinda la doctrina, además el Modelo de Suspensión de Sólidos ha validado relativamente sus resultados con dicha fórmula.

Referencias

- ¹ Okamura, Hajime. *Self-compacting High-Performance Concrete*. Concrete International. Julio 1997.
- ² Goltermann, Per; et al. *Packing of Aggregates: An alternative tool to determine the optimal aggregate mix*. ACI Materials Journal. Septiembre – Octubre 1997.
- ³ Sedran, T; De Larrard, F. *René-LCPC: Un Logicel pour optimiser la formulation des betons a hautes performances. (René-LCPC: Software to optimize the mix design of high performance concrete)*. 4th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, on Paris. 1996.
- ⁴ Sedran, Thierry; De Larrard, Francois. *Optimization of Ultra-High-Performance concrete by the use of a packing model*. Cement and Concrete Research. Vol.24, No. 6. 1994.
- ⁵ Reinhardt, H.W. *Relation between the microestructure and structural performance of concrete*. Concrete Technology: New Trends, Industrial Applications. RILEM. 1995.

VII. Diseño del Mortero de Alto Desempeño.

Con la amplia base teórica expuesta anteriormente relativa al comportamiento de los componentes del mortero, y su composición, además de la comprensión de los modelos de optimización de los materiales, y con la consideración acerca de la mecánica de degradación del ácido sulfúrico sobre el concreto, ya se puede definir el diseño de la mezcla.

Como ya se había indicado, el cemento a emplear sería un cemento Portland tipo I; dado su apoyo para la obtención de información de las características del cemento, se seleccionó la marca Apasco, por medio de un saco de cemento que fue aleatoriamente adquirido en algún establecimiento comercial en Monterrey, N.L. Las características del cemento son:

- Densidad = 3.12
- Fineza Blaine 3400cm²/gr

El humo de sílice, cuya proporción debiera ser de un 30% del peso del cemento, tiene las características siguientes:

- Densidad = 2.2
- Composición: 92-98% SiO₂

Su color es muy oscuro, casi negro, que aunque la ficha técnica proveída por el fabricante señala un contenido alto de SiO₂, probablemente contenga alguna cantidad de carbón.

Después de varias iteraciones en el Modelo de Suspensión de Sólidos, implementado en una hoja electrónica de cálculo, la mejor granulometría de los agregados, en términos de máxima compacidad, fue:

Tabla 7.1 Granulometría del agregado

Tamaño		% ret.
μM	ASTM	
12700	1/2 "	0
9520	3/8"	5
4760	4	15
2380	8	30
1190	16	25
595	30	16
297	50	8.8

La densidad de compactación relativa de esta granulometría, fue de 0.7522

El agregado seleccionado, el basalto del norte de Coahuila con la composición señalada con anterioridad, presentó una densidad de 2302 Kg/m³, y una absorción de 7.6%. La humedad presente al momento de la mezcla, fue de 1.6%.

Después de sustituir la información en la fórmula de la porosidad final de la matriz (6.6), y buscando la combinación que diera la porosidad más baja, por medio de iteraciones se tiene:

$$\Pi_M = \frac{0.23(0.153 + 0.02)}{1 - 0.5097} * 100 = 11.26\%$$

por lo que las proporciones finales quedan:

Tabla 7.2. Dosificación de la mezcla de mortero de alto desempeño.

	Peso/m ³	Volumen/m ³
Cemento	694.40	0.2226
Agua	153.00	0.1530
Agregado	1173.43	0.5097
Humo de sílice	208.32	0.0947
Aire	—	0.0200
Agua de saturación	70.41	—

Claramente se puede apreciar que el contenido de cemento es bastante alto, mas no se debe olvidar que se está diseñando un mortero, y este consumo de cemento es característico.

Entonces, la relación agua-cemento queda:

$$\text{Rel. - agua/cemento} = \frac{153}{694.4} = 0.2203 = 0.22$$

Sin embargo, también debemos considerar que la actividad puzolánica, función del contenido de humos de sílice, requiere de agua para sus reacciones, por lo que si se considera que requiere la misma agua por peso que el cemento, la relación agua-cementante final sería:

$$\text{Rel. -- agua / [cemento + h.silice]} = \frac{153}{694.4 + 208.32} = 0.1694 = 0.17$$

La trabajabilidad necesaria para tener un mortero fluido, se obtuvo con un reductor de agua de alto rango, de la marca EUCON 37, en dosis promedio de 29ml/Kg de cemento, la cual es muy superior a la recomendada, aunque tal dosis no es tan apreciablemente alta si consideramos el alto contenido de material fino en la mezcla, como los humos de sílice, que por su altísima área superficial requieren mayor lubricante para su desplazamiento. La compatibilidad cemento-aditivo, pudiera eventualmente asegurarse dado que estos dos productos se emplean comercialmente en combinación, así como los humos de sílice.

El mezclado se hizo en una batidora Hobart, y la secuencia de mezclado fue la siguiente:

- Se mezcla todo el humo de sílice con 1/3 del aditivo total, y la mitad del agua total por 1 minuto, a velocidad media, lo que al final produce una masa muy fluida.
- Posteriormente y a la misma velocidad se vierte el resto del aditivo y lentamente se vacía el cemento, al cual se le añade el 25% del agua total, y se mezcla por dos minutos a la misma velocidad.
- Luego se vierte lentamente la totalidad de los agregados que ya habían sido homogeneizados en seco, y el agua restante; y se continúa el mezclado por un minuto.
- Se reposa 1 minuto, y posteriormente se le da un mezclado final a velocidad media por 2 minutos.

En total se fabricaron 24 cubos de 2", los cuales se colaron de acuerdo a la norma ASTM-C-109-90, y 3 cilindros de 2"x 4". La temperatura ambiente durante el mezclado fue de 26°C, mientras que sorpresivamente la temperatura de la mezcla fue de 29°C después de una hora de que el agua hizo el contacto inicial con el cemento, lo cual se consideraría muy bajo, pero pudo haber sido consecuencia principalmente del apreciable retardo del fraguado producto de la sobredosificación del aditivo.

La consistencia de la mezcla se midió por medio de la mesa de flujo de la norma ASTM-C-230, resultando una fluidez de 114.28%. Consideramos que esta medida de la trabajabilidad es bastante

representativa, dado que por el mismo procedimiento y efecto de la mesa de flujo en la masa de mortero, que por una parte le permite ceder bajo su propio peso una vez que se ha retirado el molde, y por otra el impacto que produce la caída de la mesa rompe la viscosidad de la mezcla, en el tiempo determinado por la misma norma. Si se hace un recuento de las medidas de la trabajabilidad que se recomiendan para el concreto o mortero de alto desempeño, todas involucran algún efecto dinámico, y se mide el comportamiento de la mezcla con respecto al tiempo bajo tales efectos.

En cuanto a la apariencia de la mezcla en estado fresco, presentaba una coloración muy oscura, casi negra, en parte por los humos de sílice que tenían un color negro; aunque era una masa fluida, tenía una viscosidad bastante alta, que la hacía sumamente pegajosa, adheriéndose a cualquier objeto con que estuviera en contacto, como la olla y la paleta de la batidora; su desplazamiento se hacía con facilidad, pero se detenía abruptamente cuando cedía el ímpetu que la puso en movimiento. Por la alta viscosidad que presentó, indudablemente que la compactación provista por la norma para la fabricación de los cubos fue insuficiente para desalojar todo el aire atrapado.

El mortero se mantuvo en los moldes durante 24 horas, debidamente cubierto con polietileno, y a la temperatura ambiente. Posteriormente, se desmoldaron y se les dio un curado sumergido por 14 días a una temperatura de 23°C, exceptuando a los tres pequeños cilindros, a los cuales se les dio un curado sumergido por 48 horas, seguido de un curado con calor a 90°C por 96 horas, al término del cual se ensayaron a compresión. Aunque se tomaron todas las medidas necesarias para evitar los cambios bruscos de temperatura, tanto antes como después del curado con calor, y después de dejar un lapso de 24 horas para que disminuyera su temperatura de 90°C a la temperatura ambiente, paulatinamente, aún dentro del horno, fue imposible evitar un microagrietamiento que presentaron los especímenes en toda su superficie, lo cual se puede atribuir a que no alcanzó la suficiente resistencia a la tensión en su curado inicial, debido al retardo significativo que causó el aditivo. Aún así, la resistencia a la compresión promedio en tales cilindros fue de 42 MPa.

VIII. Experimentación.

Una parte medular de la investigación es la experimentación, un tanto para la comprobación de las teorías estudiadas, el análisis de su comportamiento, y para estimular progresivamente la creatividad del investigador, que viene a ser una de sus características más relevantes, el ser creativo.

Mientras la investigación en la literatura provee de una fuente inagotable de conocimiento, y propicia la formación de una fuerte y sólida base, en cuanto a conocimiento científico se refiere, al tratar de utilizar los conocimientos obtenidos, el desarrollo por medio de la metodología científica es el que ha dado resultados más eficientes y eficaces, en parte por su secuencia de actividades bien determinada, el diseño de la experimentación, su proceso, la interpretación de los resultados, constituyen el conocimiento más enriquecedor al que se pueda tener acceso. La investigación bibliográfica que no forme parte del marco teórico a emplearse inmediatamente en experimentación, no es más que hacer una reseña de la literatura, y es una pésima aplicación de los recursos. Sería como alimentar un árbol que no da fruto ni sombra.

Para nuestro caso de estudio, la experimentación juega el papel más importante en todo el desarrollo de la investigación. Sería muy fácil justificar nuestra propuesta a la solución del problema con las referencias bibliográficas consultadas, más sin embargo sería darle una solución por partes, considerando cada causa-efecto de manera aislada, en vez de dar una respuesta a la problemática bajo un enfoque holístico.

Dado el objetivo general de la investigación, la problemática del caso de estudio, y el objetivo particular para la solución al caso de estudio, se hace necesario el diseño de una prueba acelerada de ataque por ácido sulfúrico al mortero de alto desempeño, que este bien caracterizada por las condiciones reales, y cuyos resultados sean precisos, uniformes, mensurables, repetibles, y con cierta facilidad de interpretación para su uso en el modelo real. Ahora si se considera que, dentro del alcance de la investigación se encuentra la predicción de la vida útil del mortero de alto desempeño diseñado, precisamente en la estructura que eventualmente se emplearía, y el costo de su ciclo de vida, la definición exacta de los parámetros a buscar en la experimentación se torna muy interesante.

En la investigación bibliográfica realizada, se pudo constatar que el estudio de la durabilidad del concreto en ambiente ácido es muy pobre. Aunque ya se han señalado algunas investigaciones¹ cuyo objetivo fue analizar el comportamiento de tal o cual constituyente del concreto bajo ataque por ácidos, y a su vez le han servido parcialmente de marco teórico a la presente investigación, solo un estudio sobre pruebas aceleradas para la comparación de diversos concretos bajo ataque por ácidos que se producen en

las granjas porcícolas (ácido láctico y ácido acético), considera que se debe ser extremadamente cauteloso con la interpretación de las pruebas aceleradas dadas las características de la experimentación y su homologación con las condiciones reales y anticipadas. Sin embargo, no fueron más allá, a predecir la vida de servicio, que es lo que el consumidor de concreto está deseoso de conocer: ¿cuánto tiempo –con precisión- va a durar su estructura de concreto?, ¿cómo se va a distribuir su inversión en el tiempo?, ¿valdrá la pena construir con concreto, en especial con concreto de alto desempeño?

Indudablemente que no es fácil asumir la responsabilidad acerca de la garantía de la durabilidad del concreto en una estructura (ni creo que exista cédula profesional que quiera estar en juego), sin embargo, haciendo las consideraciones necesarias, se considera que si se puede establecer un modelo preciso de predicción de la vida útil, el cual posiblemente necesitará ser calibrado.

Ya dentro del desarrollo del diseño de la experimentación, paralelamente se encontró en la normativa de ASTM, una prueba estandarizada para evaluar la resistencia química de concretos o morteros de cemento Portland, o de otros materiales (ASTM-C-267-96); así como una práctica estandarizada para la predicción de vida de servicio de materiales de construcción (ASTM-E-632-92); esta última norma señala específicamente una metodología en forma de diagrama de flujo, para el desarrollo de las pruebas aceleradas, la cual implícitamente se ha empleado desde el comienzo de nuestro estudio, y su uso se continuará inclusive para el análisis de los resultados.

Una vez asumida la norma ASTM-C-267-96 para la implementación de la prueba, se señalan los parámetros relevantes:

- Caracterización del ambiente de exposición. Bajo el análisis de las condiciones que se observaron en la planta, se puede considerar que la temperatura que prevalece es la misma temperatura ambiente, y lo mismo sucede con la humedad; el contacto del ácido con el concreto sería por escurrimiento y /o por un vapor del ácido sulfúrico, producido por su exposición al medio ambiente, así como por la precipitación del ácido que se condensó en la cubierta de la nave industrial. Esta condición persiste continuamente; prácticamente no existe tránsito en la zona dadas las condiciones actuales, aunque el proceso de fabricación y la congestión causados por los mismos dispositivos de fabricación hacen suponer que no se registraría un incremento considerable del tránsito.
- La caracterización del material, la cual ya se indicó en el capítulo anterior, basado en la teoría expuesta en los capítulos I al VI.

- La identificación del mecanismo de degradación, el cual consiste en la disolución principalmente del hidróxido de calcio, y posteriormente de los productos de hidratación del cemento, actuando por un proceso similar a una delaminación superficial, conocido como exfoliación, en vez de una penetración del ácido por los poros del material (como en materiales permeables), dado que se espera que el mortero de alto desempeño tenga una alta impermeabilidad.
- Los parámetros de medición de la degradación, serían la pérdida de peso del mortero, la pérdida de resistencia a la compresión, y su apariencia; algunos indicadores secundarios serían el cambio en la coloración del ácido sulfúrico durante el ataque al concreto, el cambio en el pH del ácido, que pudieran reflejar su neutralización por parte de la reacción química con los componentes del mortero, además de la pérdida de volumen de las probetas. La decisión de fabricar cubos en vez de cilindros, se basa principalmente en que es una figura cuyas superficies planas son equidistantes de su centro, lo cual daría una distancia máxima de penetración del ácido por cualquier lado; otro punto sería la evaluación en las aristas y esquinas de la degradación, dado que son zonas que suelen estar fuertemente cargadas eléctricamente, y pudieran presentar algún fenómeno físico.

Bajo las anteriores consideraciones:

- El experimento en sí consistió en la inmersión en ácido sulfúrico de las probetas de mortero de alto desempeño, las cuales tuvieron un curado sumergido por 14 días, tiempo suficiente para alcanzar la razón de hidratación del cemento más alta, según la investigación realizada en la literatura, y expuesta con anterioridad. El contenedor del ácido y las probetas, fue un casco de acumulador; el ácido sulfúrico presentó una densidad de 1.180, correspondiente a una concentración alrededor del 10%, que es tal y como se utiliza en la planta, y es propiamente el que causa el ataque en la zona de estudio. Bajo la norma ASTM-C-267-96, se consideró seguir el procedimiento señalado para cubos, incluyendo el ensaye a compresión y la velocidad de aplicación de la carga. Adicionalmente, por medio de la prueba para determinar la cantidad de huecos permeables en el concreto ASTM-C-642-97, se determinó la cantidad de poros de los especímenes a diferentes intervalos de ataque en ácido, incluyendo los especímenes testigo. Con esto se busca encontrar un avance en la permeabilidad del mortero de alto desempeño, causado por la rápida disolución del hidróxido de calcio, que pudiera crear poros o capilares, o agrietamiento causado por el azufre contenido en el ácido, o quizás la creación de pequeños poros de gel, ocasionado por el desprendimiento de partículas de H-S-C. Otras causas pudieran ser un mal comportamiento del agregado ante el ácido, o la disolución tardía de pelets de humos de sílice sin reaccionar.

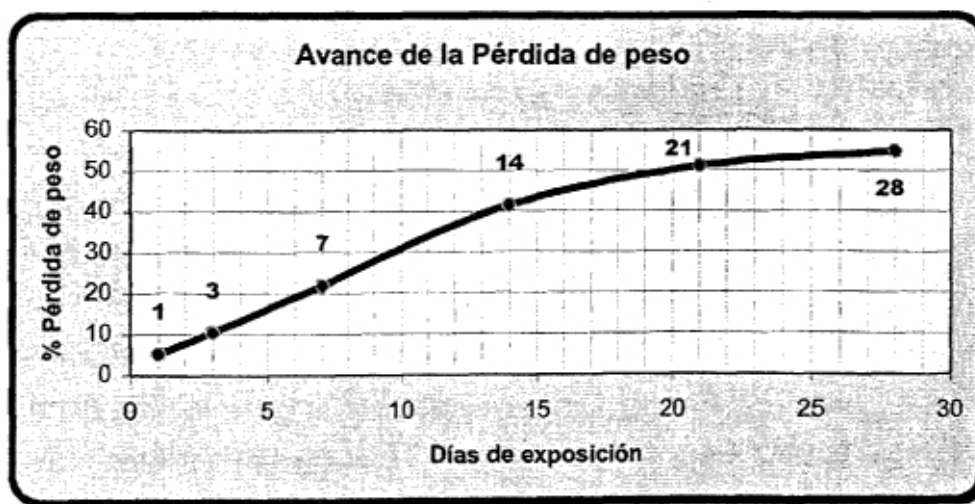
- Adicionalmente al cálculo de la resistencia a la compresión que señala la norma ASTM-C-267-96, que considera el área original del espécimen, preferiblemente también se utilizará el área actual después del ataque, dado que si hubiese un microagrietamiento no detectado por la porosimetría, sería detectable por este medio, además que interesaría más la resistencia real, que la que hubiese tenido de mantener la misma geometría. Sin embargo, sería objetable una prueba de compresión en especímenes tan pequeños, después que han perdido bastante volumen, y la influencia del tamaño máximo del agregado es significativa.

El resumen de resultados e imágenes se muestran a continuación:

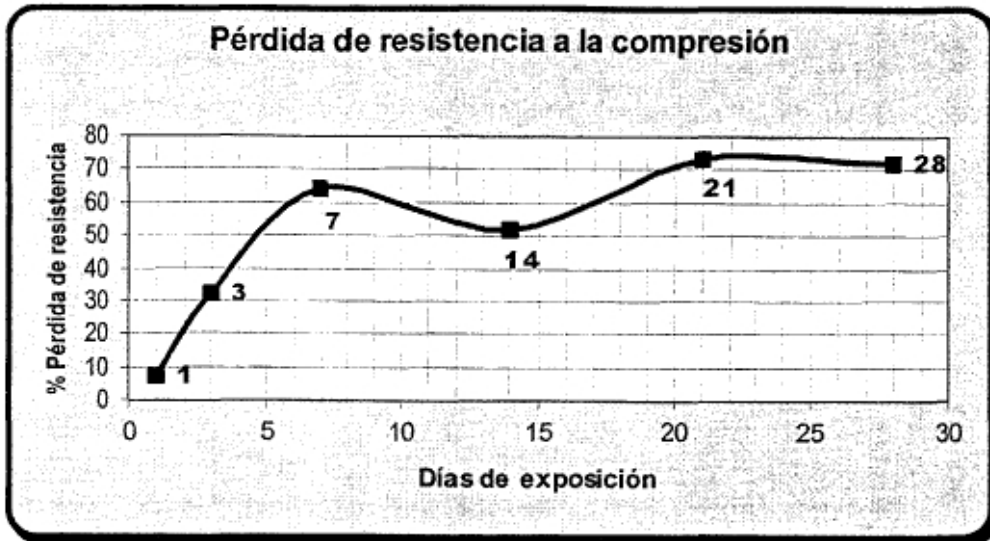
Tabla 8.1. Resultados del experimento.

Muestra (días de ataque)	Especímenes	Peso promedio inicial (grs.)	Peso promedio después del período de ataque (grs.)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión actual (MPa)	Porosidad (%)	Pérdida de peso (%)	Pérdida de resistencia (%)	Pérdida de resistencia actual (%)	Avance de porosidad (%)	pH del ácido
Testigo inicial	22,23,24	306.90	—	41.92	—	21.52	—	—	—	—	—
1	1,2,3	302.80	286.97	38.77	39.83	21.51	5.23	7.51	4.99	-0.05	0.34
3	4,5,6	300.23	268.73	28.39	29.35	24.50	10.49	32.28	29.99	13.85	0.39
7	7,8,9	302.77	236.13	15.04	15.97	21.10	22.01	64.12	62.05	-1.95	0.41
14	10,11,12	305.20	178.40	20.18	28.64	23.54	41.55	51.86	31.68	9.39	0.42
21	13,14,15	309.50	151.27	11.16	18.79	25.76	51.12	73.38	55.18	19.70	0.44
28	16,17,18	308.40	139.40	11.73	22.13	23.90	54.80	72.02	47.21	11.06	0.46
Testigo final	19,20,21	305.77	306.17	81.35	—	—	—	—	—	—	—

Gráfica 8.1. Razón de pérdida de peso.



Gráfica 8.2. Pérdida de resistencia.



Gráfica 8.3. Pérdida de resistencia actual.



Gráfica 8.4. Variación del pH del medio agresor.

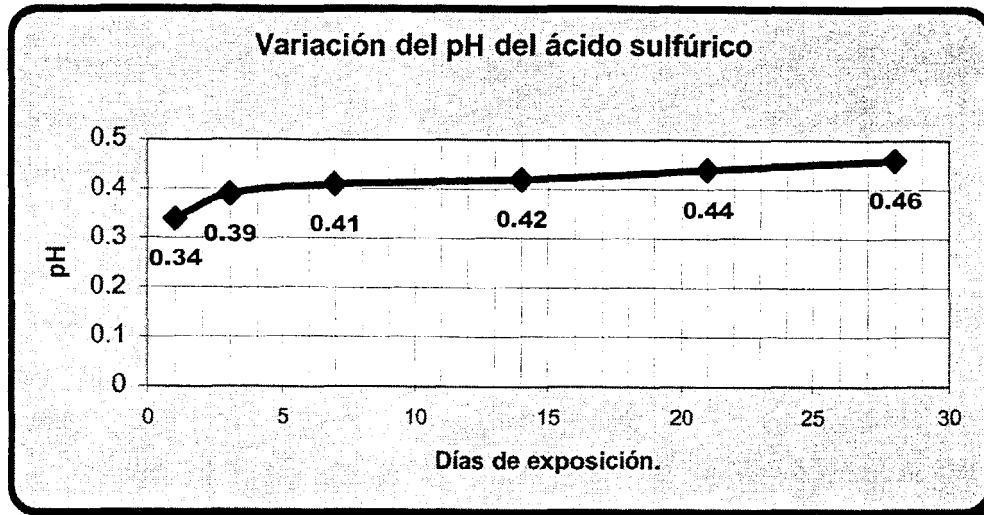


Tabla 8.2. Apreciaciones cualitativas del experimento.

Muestra (días de ataque)	Especímenes	Coloración del ácido	Apariencia de los especímenes	Imagen	Imagen después del ensaye a compresión
Testigo inicial	22,23,24	Incoloro.	Normal.	8.1	8.2
1	1,2,3	Turbio, un poco oscuro, con pequeñas burbujas.	Agregado ligeramente visible, textura ligeramente rugosa.	8.3	8.4
3	4,5,6	Muy turbio, un poco más oscuro.	Pérdida de un pequeña porción de recubrimiento.	8.5	8.6
7	7,8,9	Con muchas burbujas, color café.	Mayor volumen de agregado expuesto, pero bien cementado y sin cambios físicos notables	8.7	8.8
14	10,11,12	Color café oscuro, con burbujas en zona de especímenes.	Agregado totalmente expuesto, bien cementado, no hay grietas visibles.	8.9	8.10
21	13,14,15	Color café, con sedimento de los productos del mortero.	Gran pérdida de recubrimiento, agregado en buenas condiciones.	8.11	8.12
28	16,17,18	Color café muy oscuro, grandes cantidades de sedimento del mortero.	Agregados expuestos pero bien cementados, sin agrietamiento aparente.	8.13	8.14
Testigo final	19,20,21	_____	_____	8.15	8.16

La interpretación de los resultados anteriores, para nuestra finalidad, y dentro de las expectativas, no son muy favorables, dado que se esperaba que con asumir las consideraciones teóricas expuestas en los anteriores capítulos, el mortero de alto desempeño tendría un comportamiento más alto, sin embargo, se debe recordar que ésta es una prueba acelerada del ataque del ácido sulfúrico en el mortero de alto desempeño.

Aún así, la información obtenida es muy valiosa para el pronóstico de la vida de servicio del mortero de alto desempeño en las condiciones de exposición ya conocidas, como se establecerá más adelante.

Como era de esperarse, existió una fuerte degradación de los productos de hidratación del cemento, y de los propios de la actividad puzolánica, pero se debe considerar que la solución atacante tenía a su inicio un pH bajísimo de 0.34 al empezar la prueba, que es una solución extremadamente agresiva para una masa como los productos de hidratación del cemento Portland que tienen una elevada alcalinidad. Pero más que analizar el efecto que produjo el ácido, para el propósito de predicción de la vida de servicio, es de mayor relevancia apreciar cual fue la mecánica de degradación que sufrió el mortero de alto desempeño.

Dentro de los parámetros que se buscaron al diseñar la mezcla era el de conseguir una porosidad final de la matriz del mortero, y cuya comprobación posterior por medio de la norma ASTM-C-642-97, resultó en un valor casi el doble que el esperado; sin embargo, las observaciones acerca de la fórmula para calcular la porosidad final de la matriz ya se indicaron, además que el efecto de las características del agregado no las considera, y habría que recordar que el agregado contiene ciertas cantidades (aunque razonablemente pequeñas) de compuestos de calcio, que son fácilmente diluidos por el ácido, y crear un poro en su lugar. Sin embargo, en cuanto al control de la porosidad del mortero de alto desempeño bajo el intenso ataque del ácido, es remarcable su buen comportamiento, puesto que dentro de las expectativas que se tenían acerca de la mecánica de degradación estaban el potencial ataque de los sulfatos presentes en el ácido, que una vez que penetraran por algún hueco, podrían causar un severo microagrietamiento, pero el mortero prácticamente no mostró aumento objetable en la porosidad, y mejor que eso se mantuvo estable, lo cual nos indica claramente que el ácido no pudo penetrar por los eventuales capilares o poros que se hubiesen formado en la masa del mortero, y tampoco causó microagrietamiento, lo cual nos corrobora nuestra primera hipótesis de que el ataque se llevaría a cabo superficialmente, y su avance sería en forma de exfoliación.

Entonces el parámetro de pérdida de peso, indicaría de manera más tangible la razón de degradación del mortero. Se debe considerar que el hecho de que el mortero de alto desempeño en 7 días haya tenido una pérdida de peso considerable en el experimento, no significa que estas condiciones se presentarán en su aplicación práctica, es necesario recordar que se está tratando con información de una prueba acelerada, y su correspondiente comportamiento se pronosticará en base a la creación de un modelo que habrá de implementarse en el escenario real, y cuyo monitoreo indicará cual será la vida de servicio de la estructura.

Entonces si se aprecia la gráfica 8.1 correspondiente a la razón de pérdida de peso, se puede observar que entre el inicio de la prueba y los 14 días de maduración del experimento existe un avance lineal de la pérdida de peso (que se podría interpretar que es proporcional e idéntica a la pérdida de volumen, dado que el ataque no está causando incremento en la porosidad, o agrietamiento, que podría disminuir el peso y conservar un volumen aparente), y es ésta relación lineal la que dará la base para nuestro modelo de predicción de vida de servicio.

Como el volumen (que ya se estableció que es homólogo al peso) es el parámetro físico (entre otros parámetros cualitativos también importantes) que definirá el término de la vida útil del mortero de alto desempeño ya implementado en el piso dentro de la planta, es muy importante que la relación de su pérdida con respecto al tiempo es lineal, dado que un monitoreo en las primeras edades será la información que indicará cuanto ha de durar el piso en condiciones de uso aceptable. De acuerdo con las observaciones cualitativas realizadas a los especímenes, en cuanto a la apariencia y rugosidad que presentaron, la señalada en los especímenes con una edad de 7 días, es bastante aceptable, y correspondería a una pérdida aproximada de 22% en nuestras probetas. En el espesor del piso diseñado, una pérdida de 22% en peso (o en volumen) correspondería a casi 1cm. de reducción de su espesor, por lo cual sería inaceptable si se considera que la rugosidad originada por el agregado (que aún en estas condiciones de pérdida de peso se encuentra perfectamente cementado, y su remoción no se hace tan fácilmente) sería muy alta. Lo anterior lleva a señalar la cautela que se debe seguir cuando se analizan este tipo de resultados. Efectivamente la rugosidad experimentada a los 7 días es aceptable, solo que la pérdida de peso se distribuye entre las 6 superficies iguales, ortogonales, y equidistantes, que tienen los cubos. Nuevamente las apreciaciones cualitativas son relevantes, cuando proporcionan la información de que el ataque (o mejor expresado, la degradación) se produjo por igual en todas las caras, y sobre todo, se mantuvo la forma cúbica original de los especímenes, con unas aristas bien señaladas, y sin ningún efecto físico apreciable diferente de el resto de la masa de los especímenes. Entonces, se puede fácilmente distribuir el 22% de pérdida entre las 6 caras considerando que los especímenes originales no son cubos

perfectos, sino que tienen un lado ligeramente más grande que los demás, lo que equivaldría a una pérdida de recubrimiento de 1.9mm., y que se adoptaría como la especificación mínima de servicio del piso y a partir de la cual su función se demerita (aunque cabe señalar que en el aspecto durable, su comportamiento todavía continúa siendo lineal con respecto al tiempo).

Para la determinación precisa de la vida de servicio, se hace entonces indispensable la operación de una experimentación en escala real del mortero aplicado en el piso, y bajo la compactación que le daría una placa vibratoria, y el curado húmedo de 14 días, donde el monitoreo continuo o a intervalos, de su peso o de su volumen, y la graficación de las razones de pérdida de peso y/o volumen con respecto al tiempo, y su extrapolación hasta que se obtenga una pérdida de volúmen correspondiente a 1.9mm, y su respectivo tiempo de ocurrencia, es en realidad el modelo de predicción de vida útil para el presente caso de estudio.

Como el tiempo para la realización de la presente investigación ha sido muy limitado, entonces el análisis del costo del ciclo de vida se dejará en función de el dato que eventualmente se encontrara.

Con respecto a los ensaye de resistencia a la compresión, la tendencia de la baja en la resistencia en el análisis con dimensiones actuales de los especímenes, se puede atribuir en parte por el efecto del tamaño máximo del agregado en especímenes tan pequeños como los de los últimos intervalos; y por otra parte por las condiciones del ensaye, dado que hubieron de cortarse los extremos rugosos de los especímenes, y posteriormente aplicárseles un recapeado con azufre. Un caso particular de las características de resistencia a la compresión corresponde a los especímenes de 7 días de exposición, puesto que precisamente su recapeado defectuoso fue lo que originó tan baja resistencia, según se puede observar en la imagen 8.8, donde se aprecia una fractura generalizada de los especímenes.

En términos generales, el mortero de alto desempeño diseñado tuvo una resistencia bastante buena, de 81 MPa , despues de 14 días de curado sumergido, y 28 días de curado al ambiente. Cabe aclarar que la resistencia obtenida de los especímenes, fue por medio de la misma prueba de resistencia química (ASTM-C-267-96), la cual señala cierta velocidad de aplicación de la carga (~18.33 Kg/s), que se llevo un tiempo de aplicación de aplicación de la carga de casi 120 segundos, lo cual es un tiempo muy superior a el intervalo de 20-80s que señala ASTM, por lo que los especímenes certeramente estuvieron bajo fatiga, que eventualmente pudo disminuir su resistencia medida en otras condiciones.

Más sin embargo todavía queda la duda acerca de como era que se estaba llevando a cabo la degradación del mortero de alto desempeño, esto es, que era lo que estaba pasando a nivel

microestructura, lo cual llevó a hacer un análisis morfológico y de química elemental del mortero y de sus diferentes fases (en zona sana sin ataque, en la zona de ataque, y en la zona de transición entre las dos), para las edades más relevantes, por medio de un microscopio electrónico de barrido.

Tabla 8.3. Imágenes Microscópicas

Imágenes Microscópicas	
Edad	Imagen
1 día	M8.1, M8.2, M8.3, M8.4, M8.5, M8.6
3 días	M8.7, M8.8
7 días	M8.9, M8.10, M8.11, M8.12, M8.13, M8.14, M8.15
14 días	M8.16, M8.17, M8.18, M8.19, M8.20, M8.21, M8.22, M8.23
Testigo	M8.24, M8.25, M8.26

Imagen 8.1 y 8.2. Especímenes antes y después del ensayo a compresión.



Imagen 8.A. Distribución de los especímenes en contenedor de ensaye.

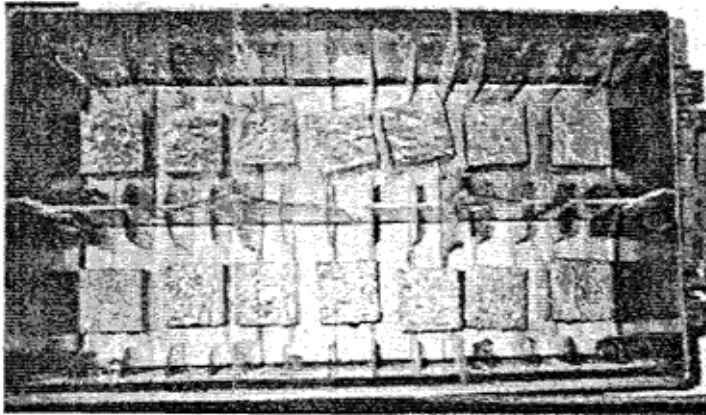


Imagen 8.B. Aplicación del ácido.

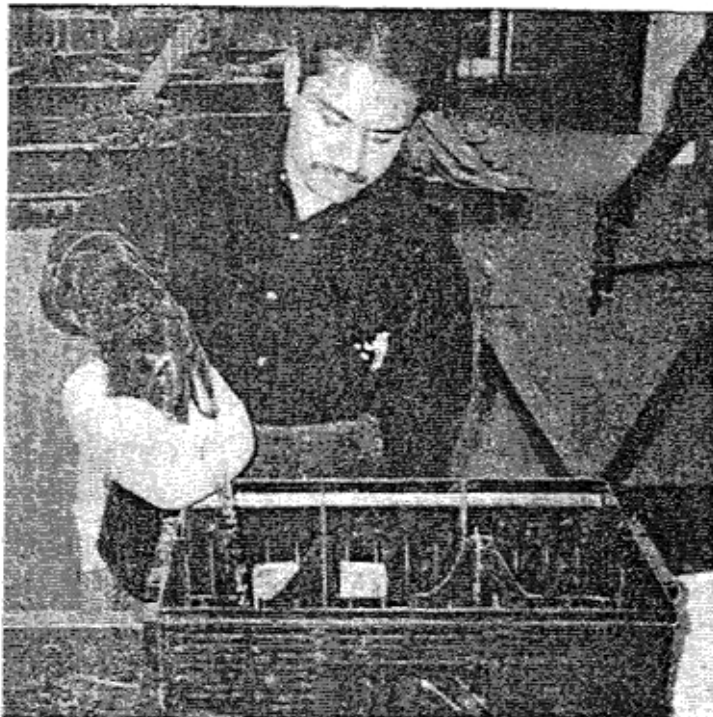


Imagen 8.C. Otra vista de la aplicación del ácido.

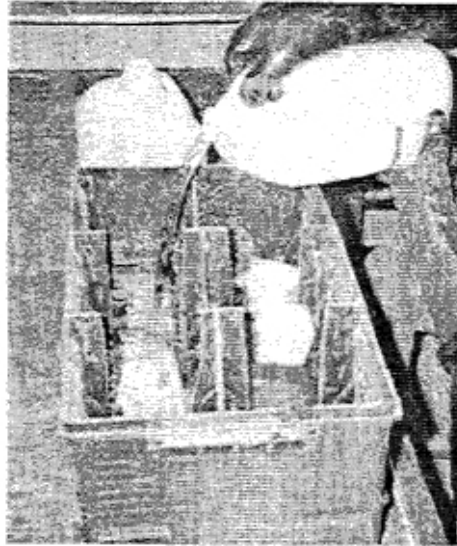


Imagen 8.D. Apreciación de la coloración del ácido en el contenedor, al inicio de la prueba.

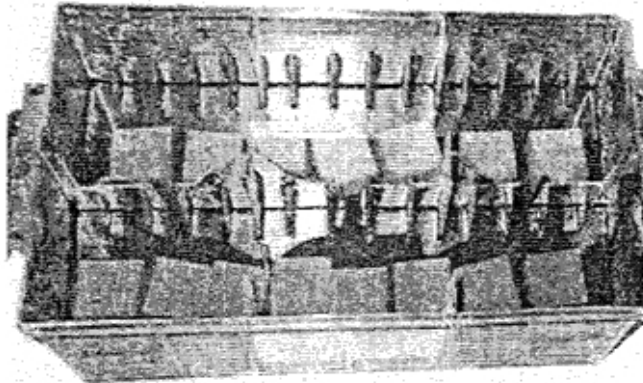


Imagen 8.3. Aspecto de los especímenes a las 24 horas de ataque.

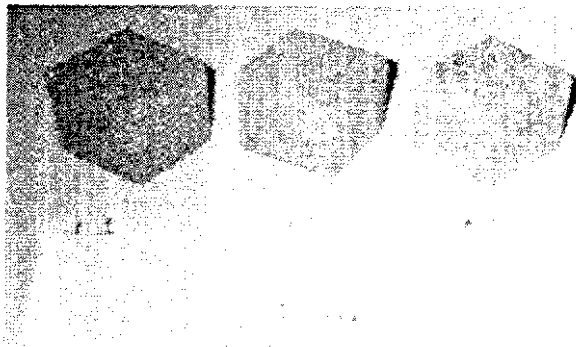


Imagen 8.4. Se aprecia el cambio de coloración entre la zona atacada y la zona sana.

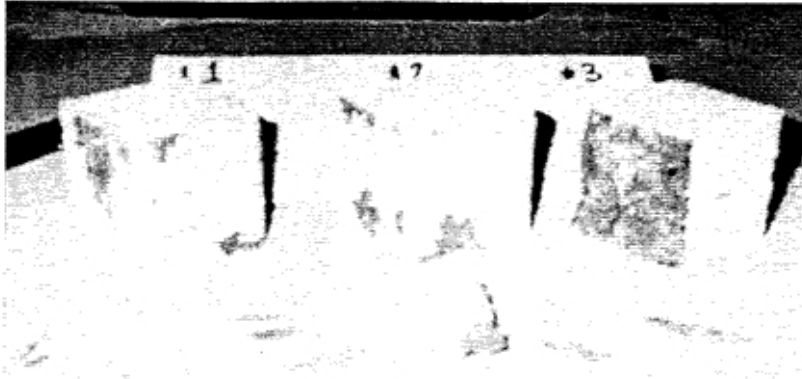


Imagen 8.E. Cambio de coloración del ácido a las 24 horas de inicio. Se aprecian burbujas de aire.

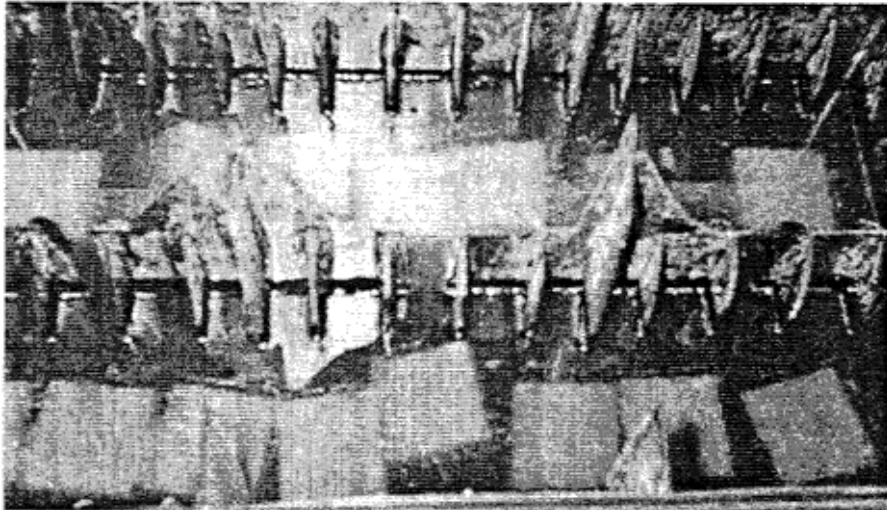


Imagen 8.5. Aspecto de los especímenes a los 3 días de ataque.



Imagen 8.6. Fallas a la compresión más pronunciadas en las superficies.

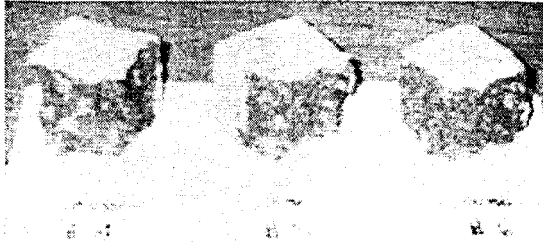


Imagen 8.7. Aspecto de los especímenes a los 7 días de ataque. Esta sería la apariencia del parámetro cualitativo para indicar el inicio de la rehabilitación del sistema de piso.

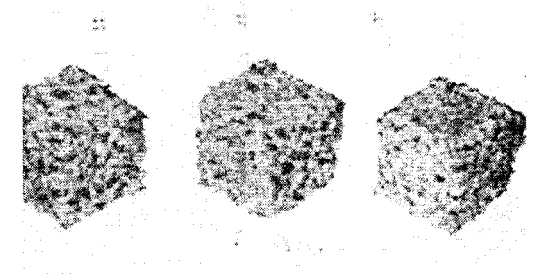


Imagen 8.8. La falla muestra claramente una prueba de compresión objetable.

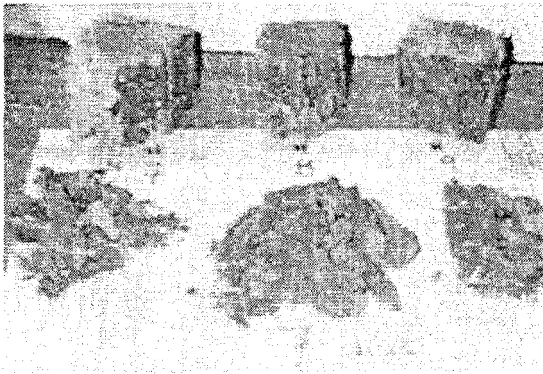


Imagen 8.10. Fallas por el ensaye de compresión a los 14 días de ataque.



Imagen 8.9. Apariencia de los especímenes después de 14 días de inmersión en el ácido.

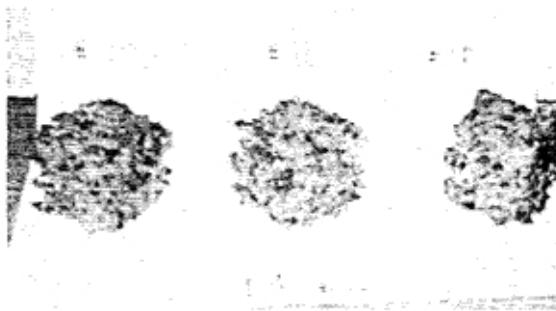


Imagen 8.11. Apariencia de los especímenes a los 21 días de inmersión en ácido.

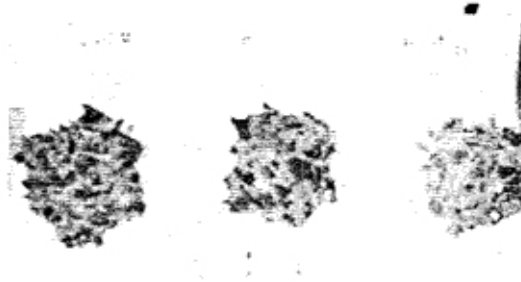


Imagen 8.13 y 8.15. Diferencias entre el espécimen testigo final y el de 28 días en ataque.

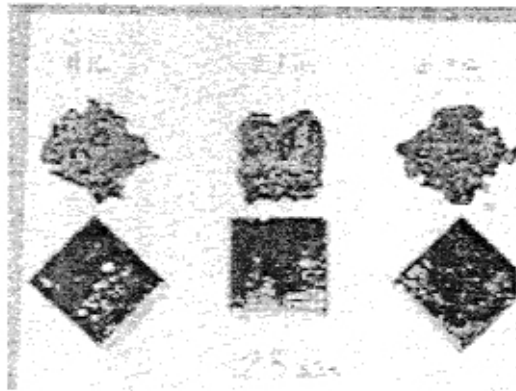


Imagen 8.14. Se hubieron de recapear los especímenes para su ensaye a compresión.



Imagen 8.16. Falla a la compresión de los especímenes testigo final.



Imagen 8.F. Coloración del ácido al término de los 28 días de la prueba.

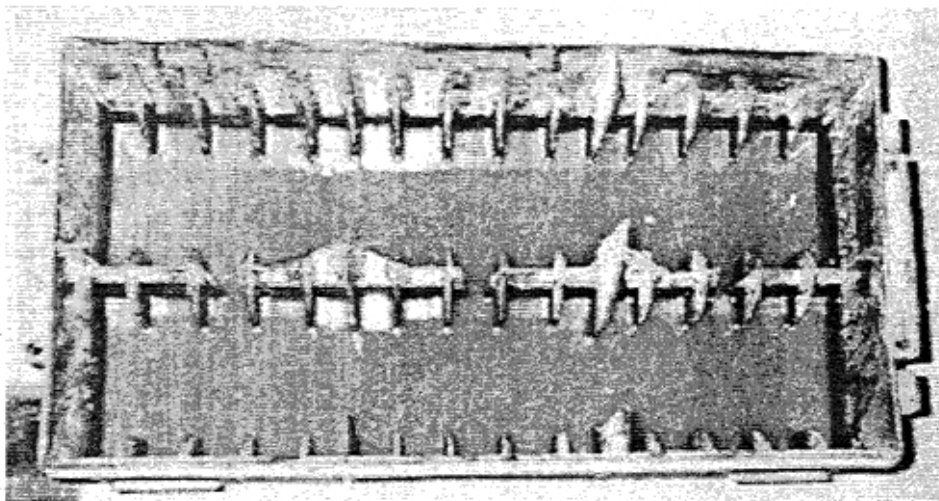


Imagen M8.1. Se observa la generalización de la zona de ataque. No se observa agrietamiento. Presencia de sílice y azufre.

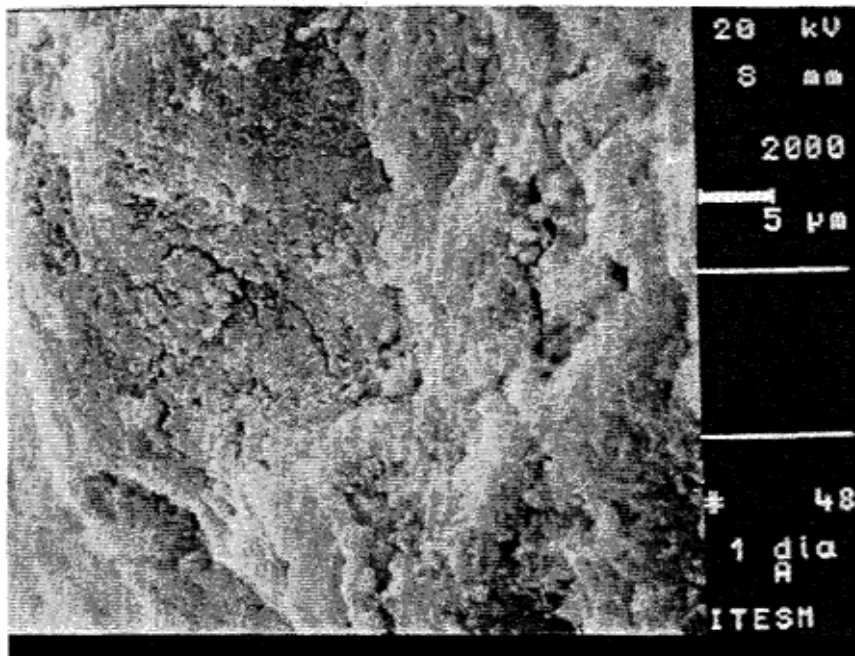


Imagen M8.2. Zona de ataque del ácido. Se muestra un área donde se aprecian formaciones ricas en azufre. También se pueden observar partículas de calcio en proceso de disolución entre los intersticios.

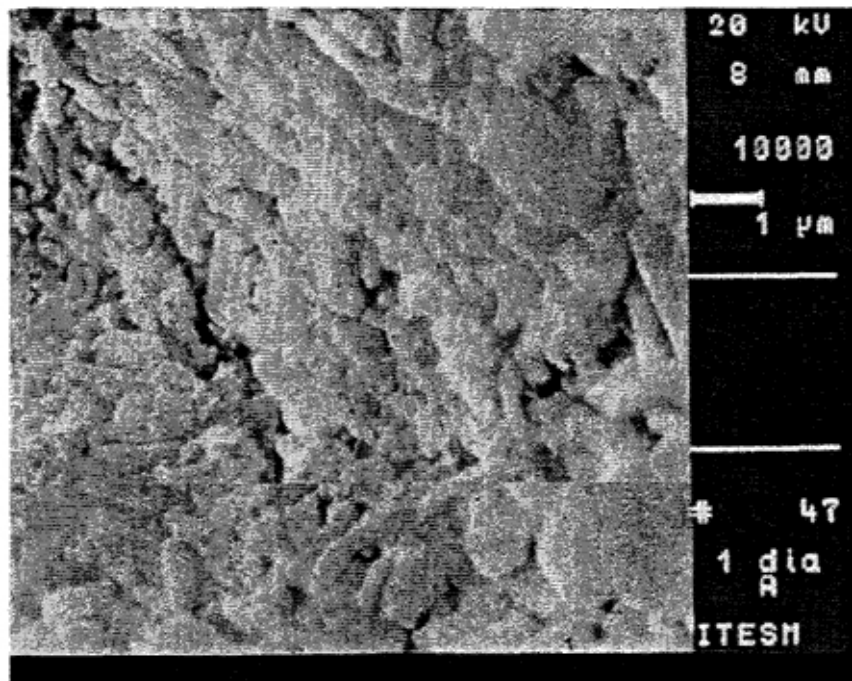


Imagen M8.3. Zona de interfase con un agregado. Al fondo se observa el agregado cubierto por una pasta densa, sin poros y al frente, un hueco con partículas de humos de sílice sueltas y algunos cristales de hidróxido de calcio.

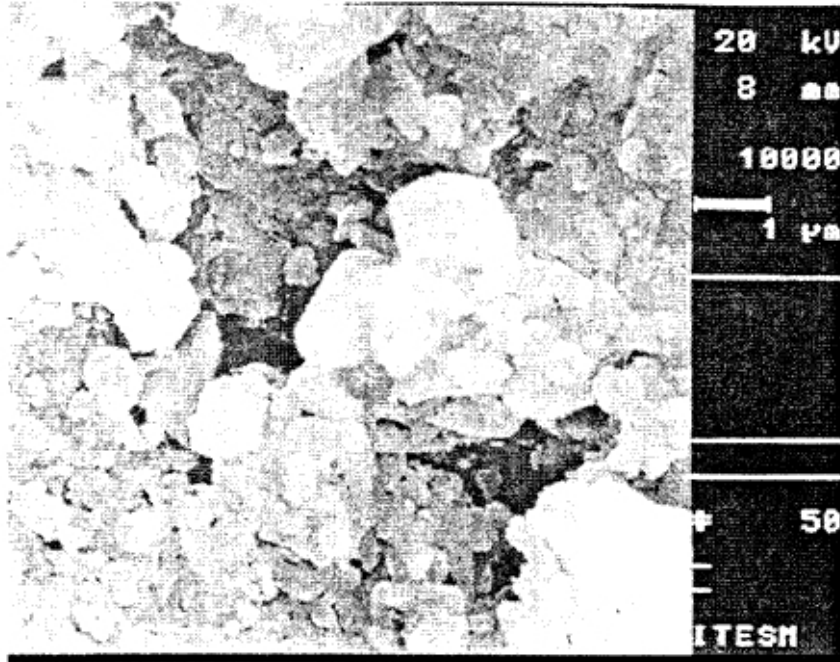


Imagen M8.4. Una grieta por falla mecánica rodea a un agregado.

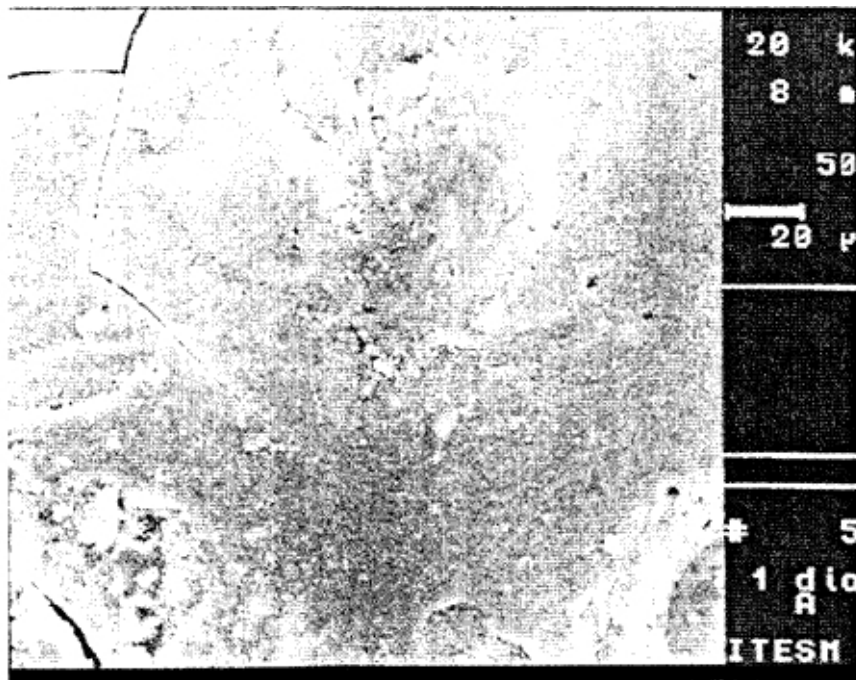


Imagen M8.5. Zona sana. No se aprecian capilares ni macroporos en la pasta. Algunas partículas de cemento sin reaccionar.

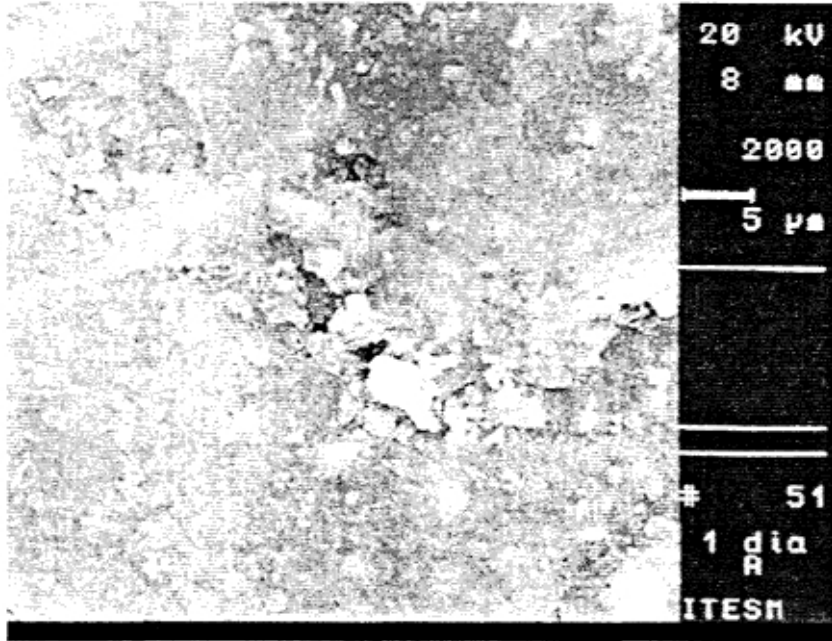


Imagen M8.6. Acercamiento a la fase hidratada. Se observan partículas de humos de sílice sin reaccionar y otras parcialmente reactivas. No se aprecian capilares, ni hidróxido de calcio.

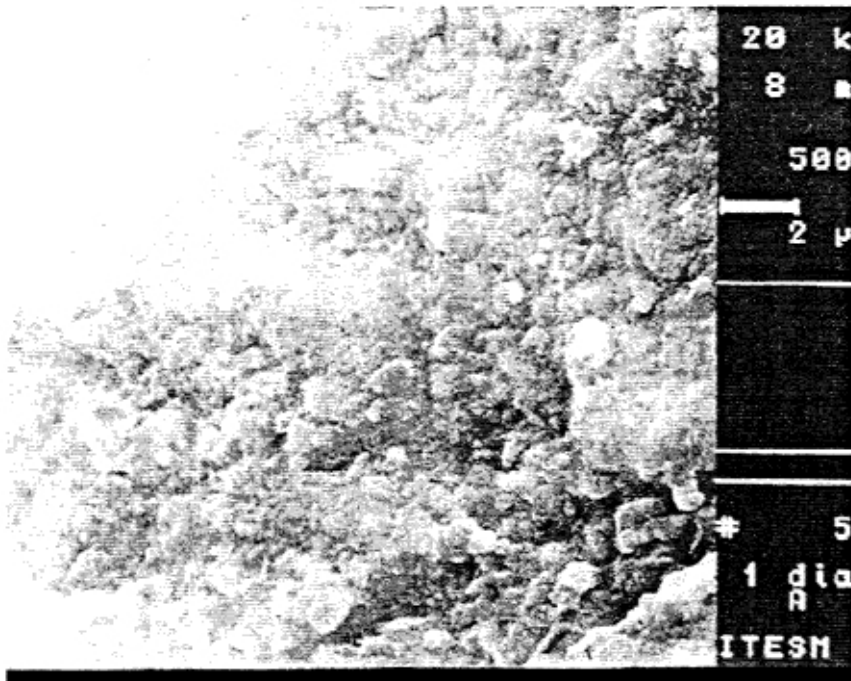


Imagen M8.7. Zona de ataque. Se aprecia que ha desaparecido el calcio intersticial. Origen de cristales con un contenido cercano a 40% de azufre.

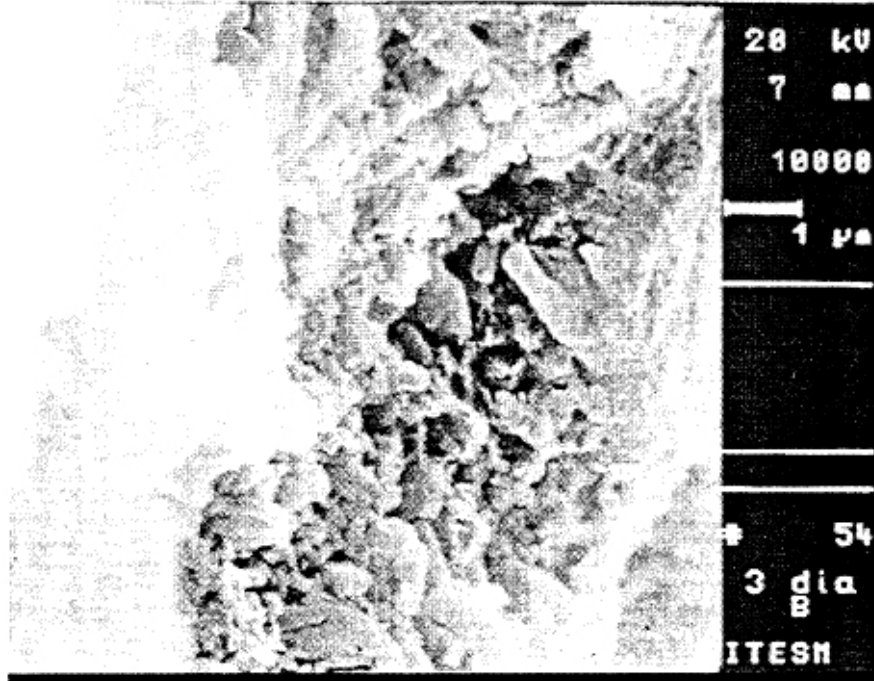


Imagen M8.8. Zona sana adjunta a la zona de ataque. No se aprecia agrietamiento. Partículas de humo de sílice parcialmente reactivas.

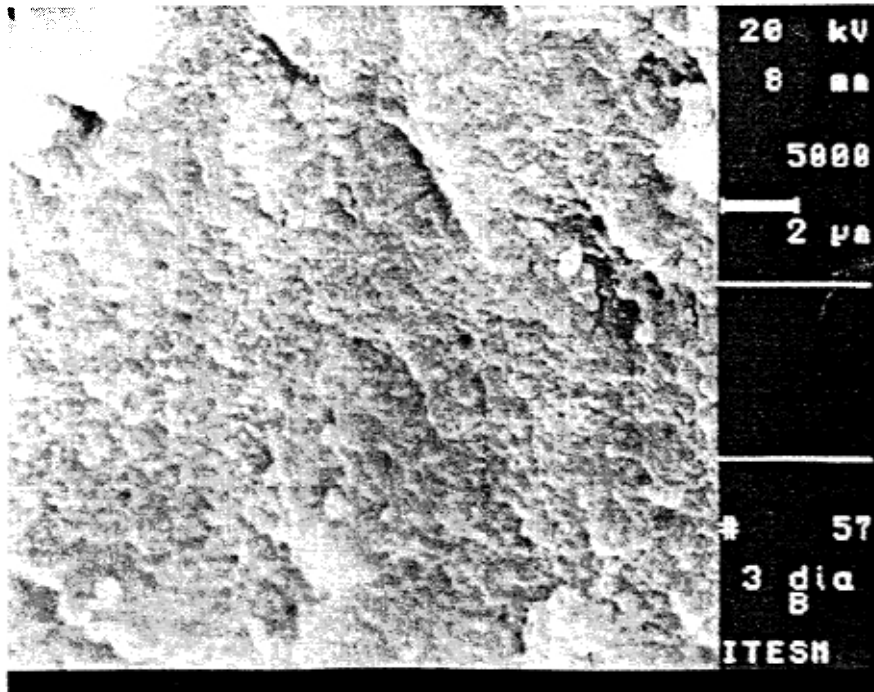


Imagen M8.9. Interfase pasta-agregado. Se aprecian huecos causados por burbujas de aire y granos de humos de sílice densificado sin disolverse.

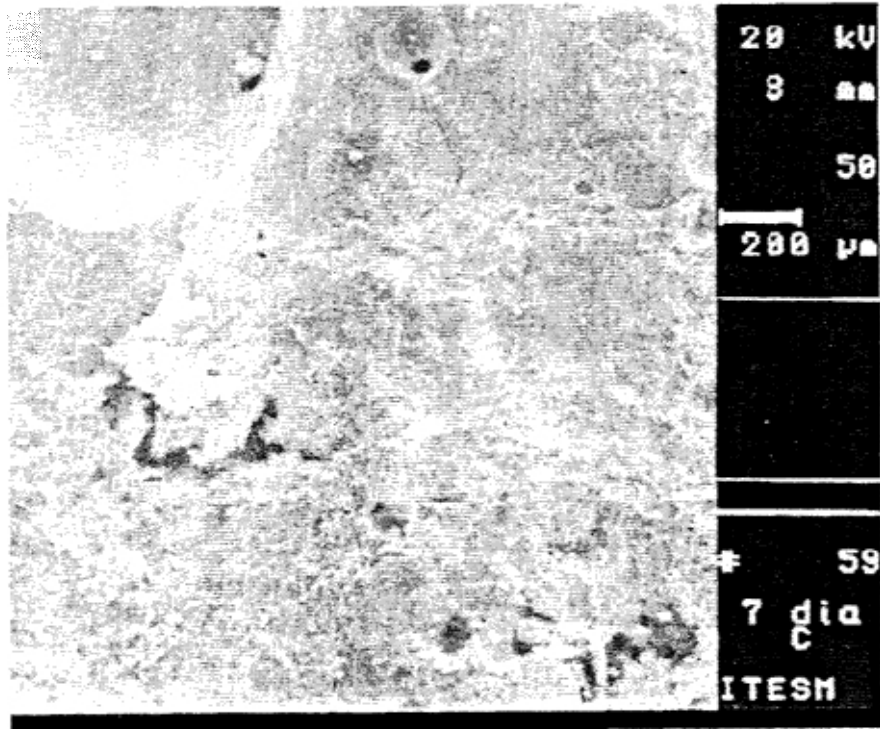


Imagen M8.10. Zona de ataque. Al frente se aprecia como avanza el ataque en una fase sana.

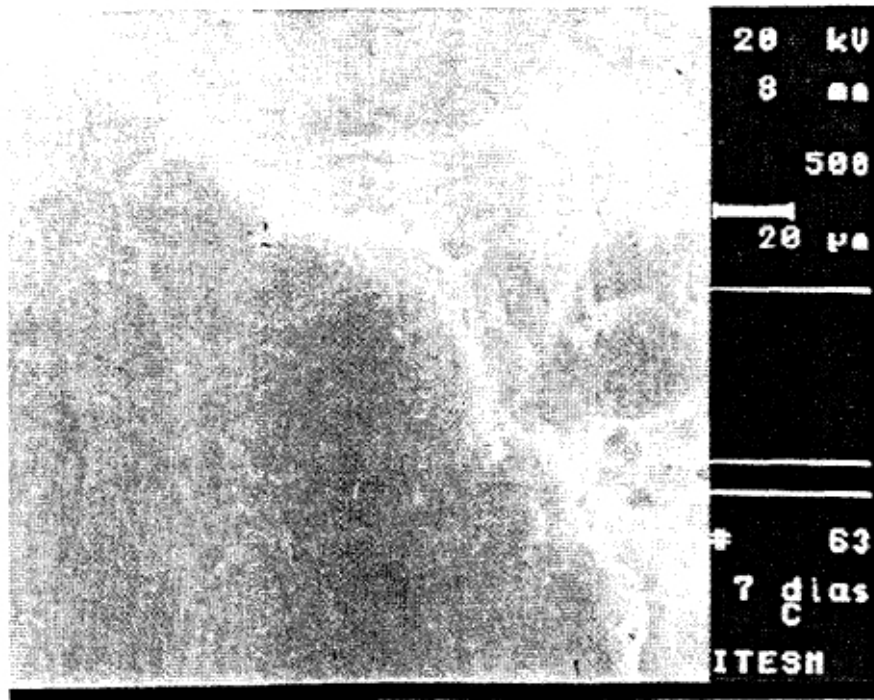


Imagen M8.11. Zona de ataque. Se empieza a desprender la fase con calcio.

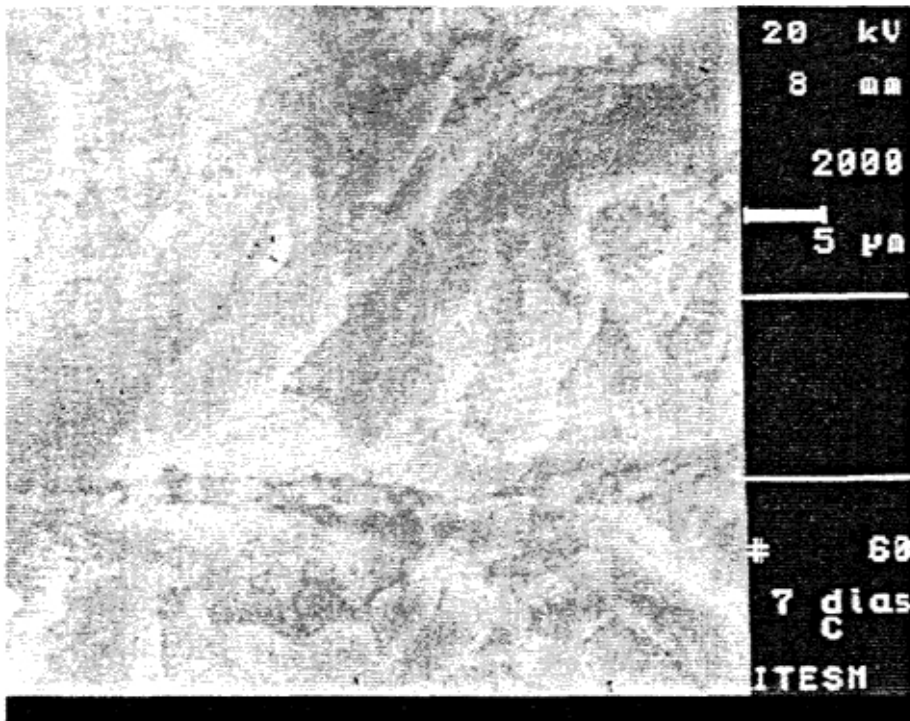


Imagen M8.12. Vista generalizada de la zona de ataque. Cristales de diversos tamaños, los más grandes corresponden a un alto contenido de sílice.

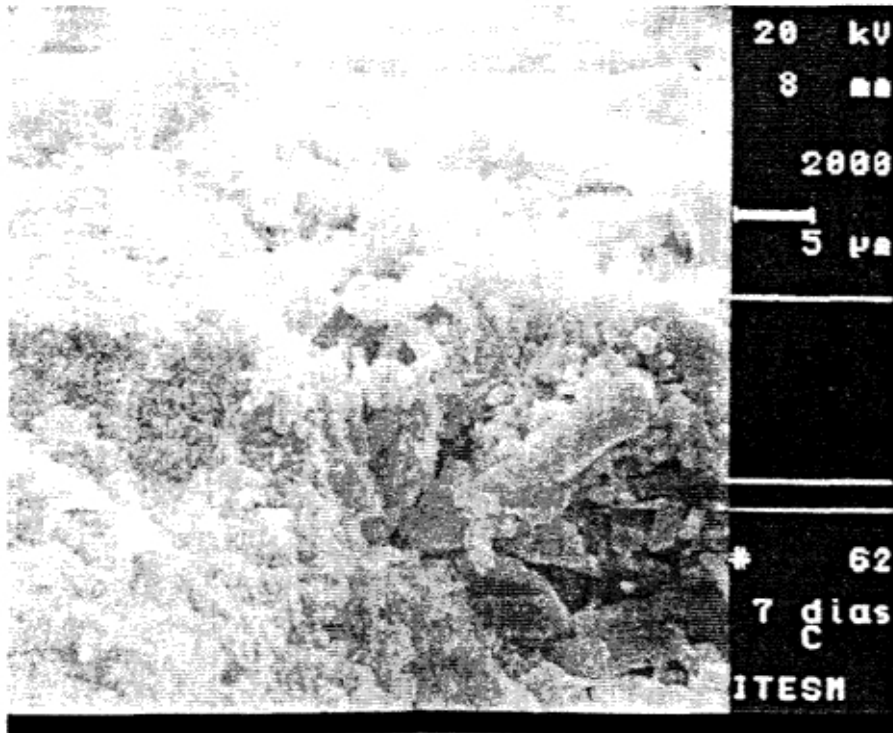


Imagen M8.13. Zona de ataque. Notable porosidad. Cristales con contenidos de sílice y azufre.

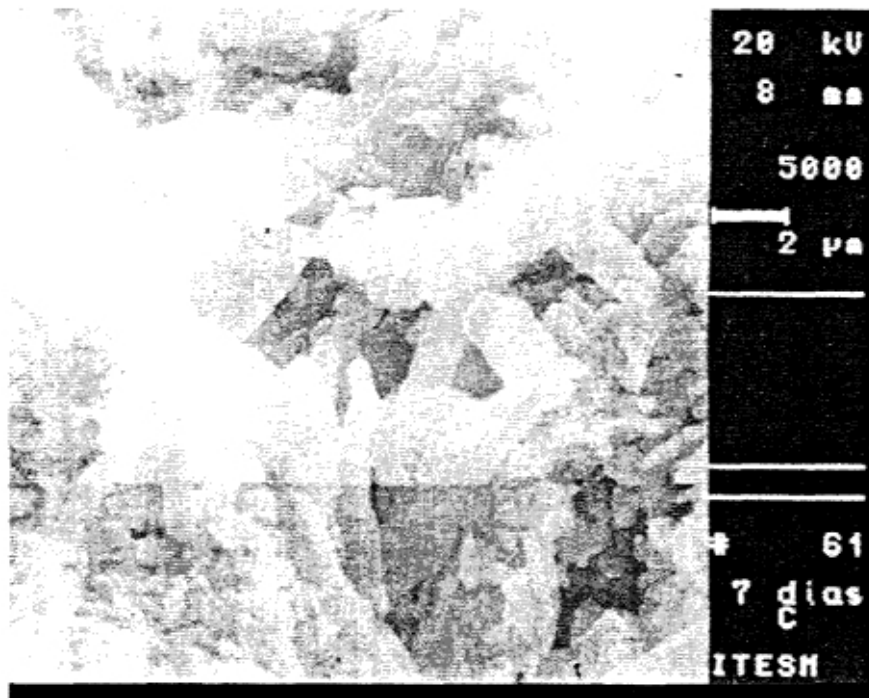


Imagen M8.14. Zona de transición entre la fase sana y la atacada.

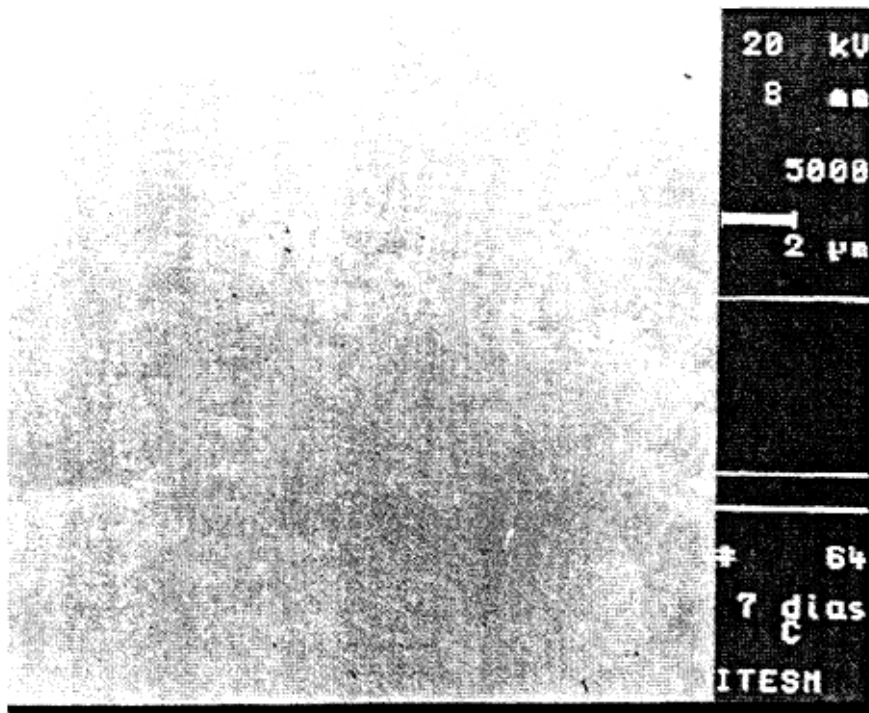


Imagen M8.15. Acercamiento a la transición de fases. No se aprecia agrietamiento ni penetración del ataque.

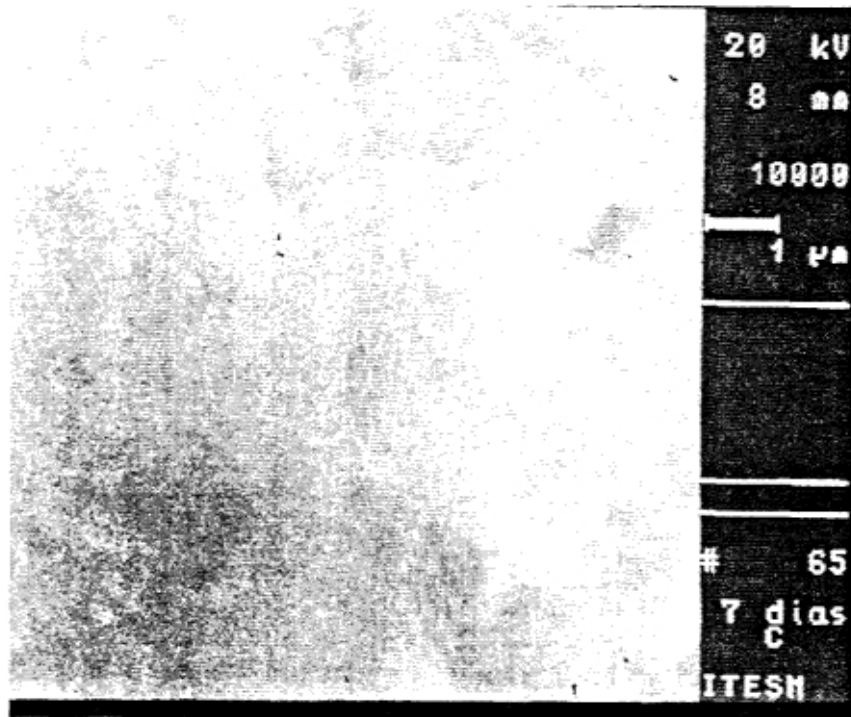


Imagen M8.16. Vista de la muestra. Se observa fácilmente el cambio de fases.

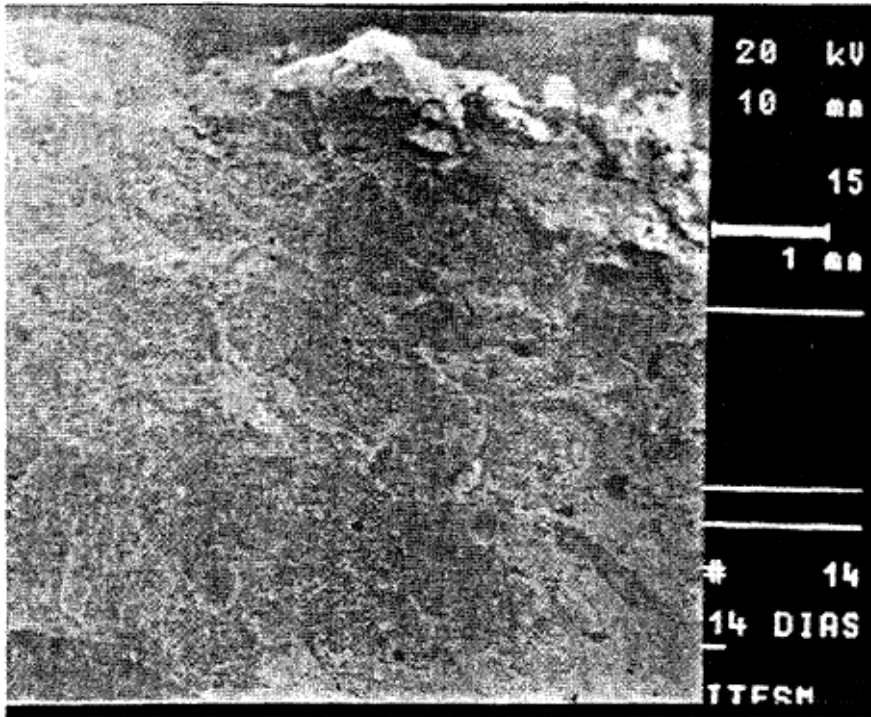


Imagen M8.17. Apreciación del ataque. Cambios que ha sufrido la superficie plana del espécimen.

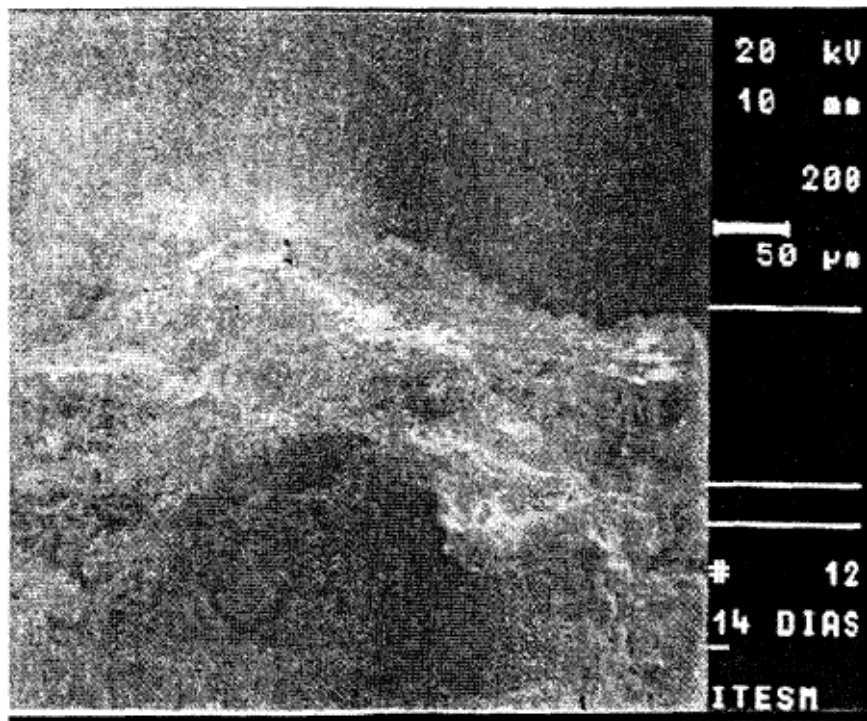


Imagen M8.18. Generalización de la zona atacada. Porosidad considerable.

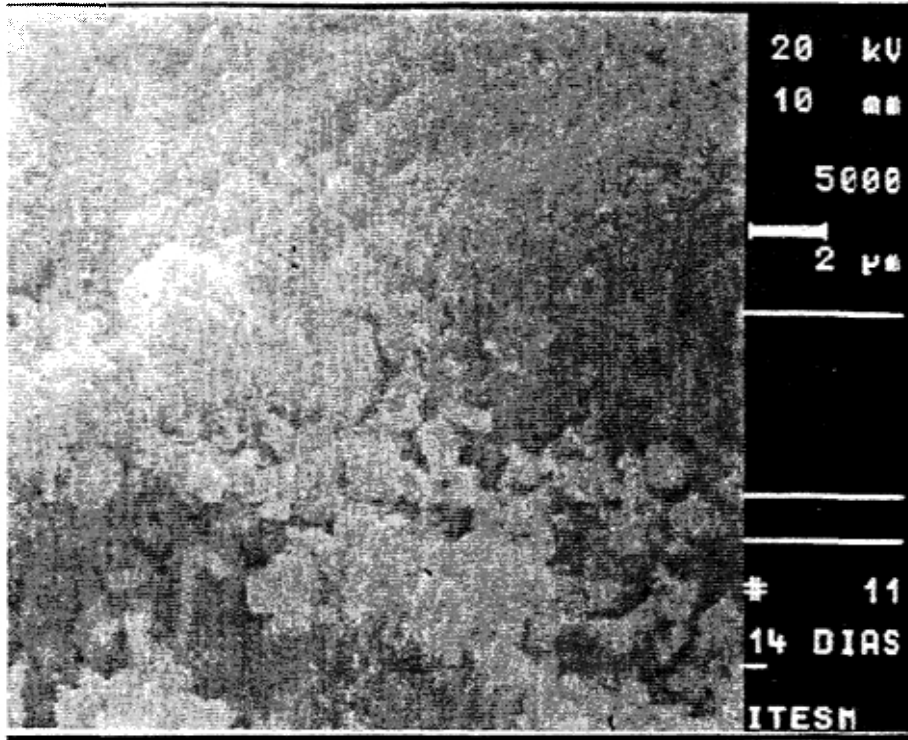


Imagen M8.19. Vista de la zona de cambio de fase.

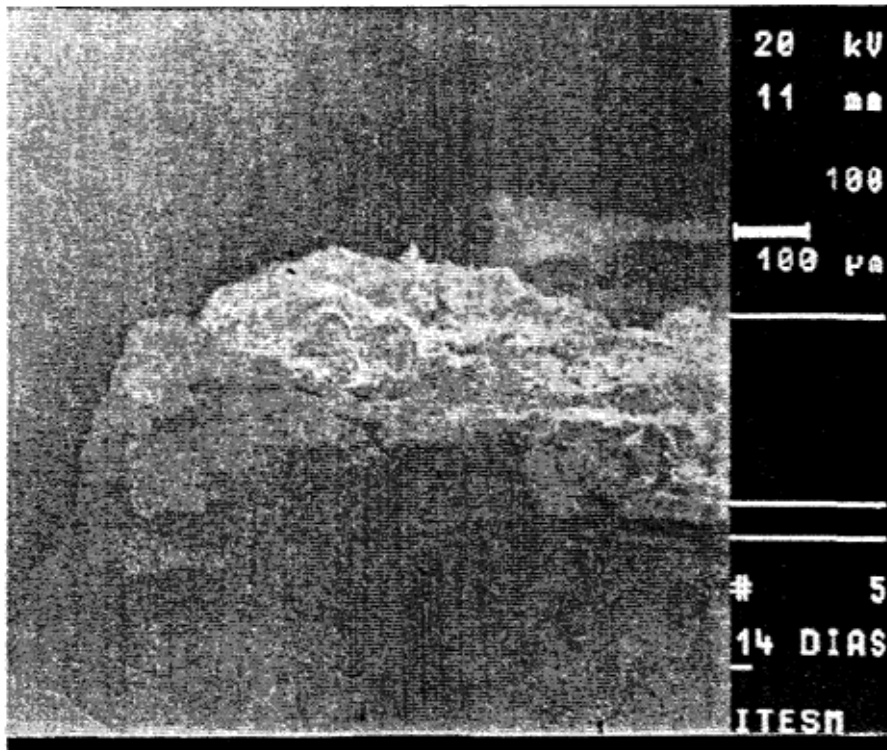


Imagen M8.20. Zona de cambio de fases. No se aprecia daño trascendente a la zona sana, la cual se observa bastante densa.

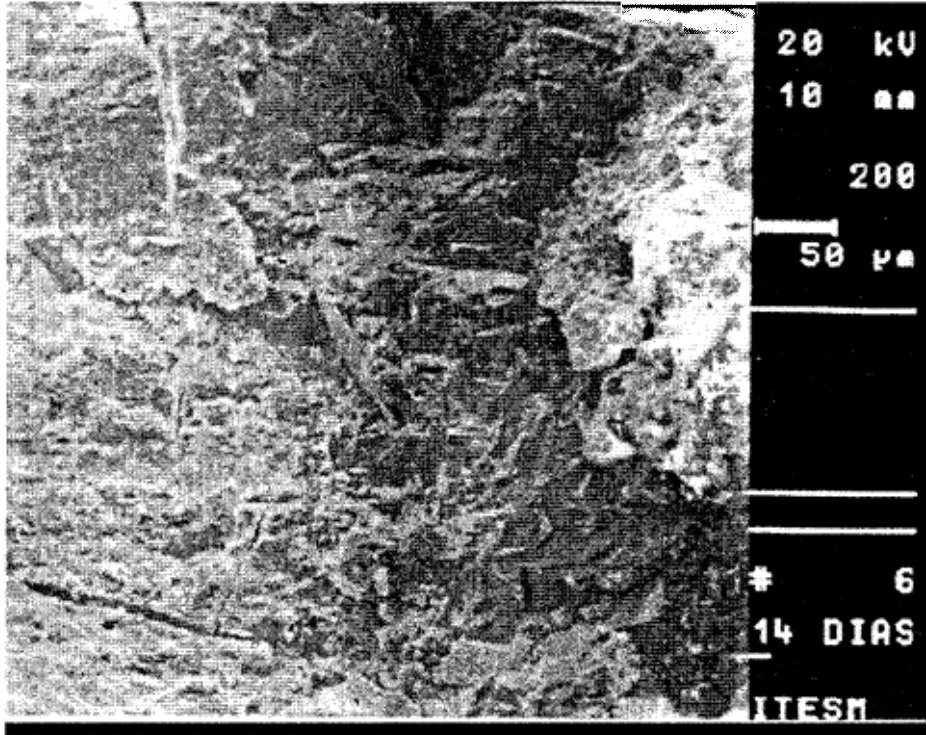


Imagen M8.21. Acercamiento al cambio de fases. Se observa desprendimiento entre la zona sana y la zona afectada.

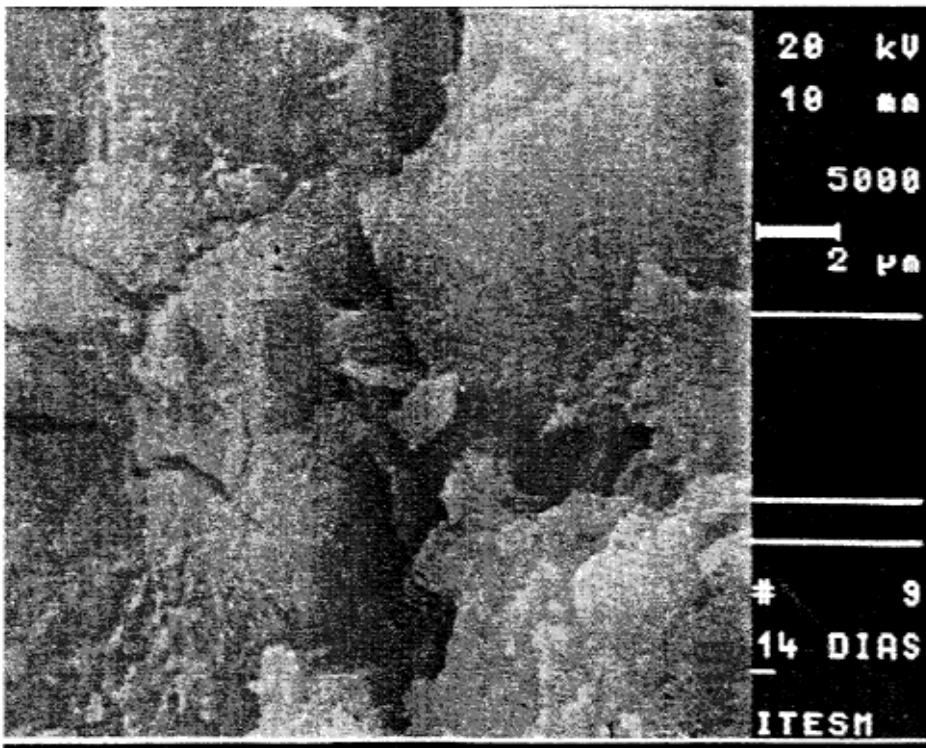


Imagen M8.22. Zona de cambio de fases. Cristalización contra masa amorfa.

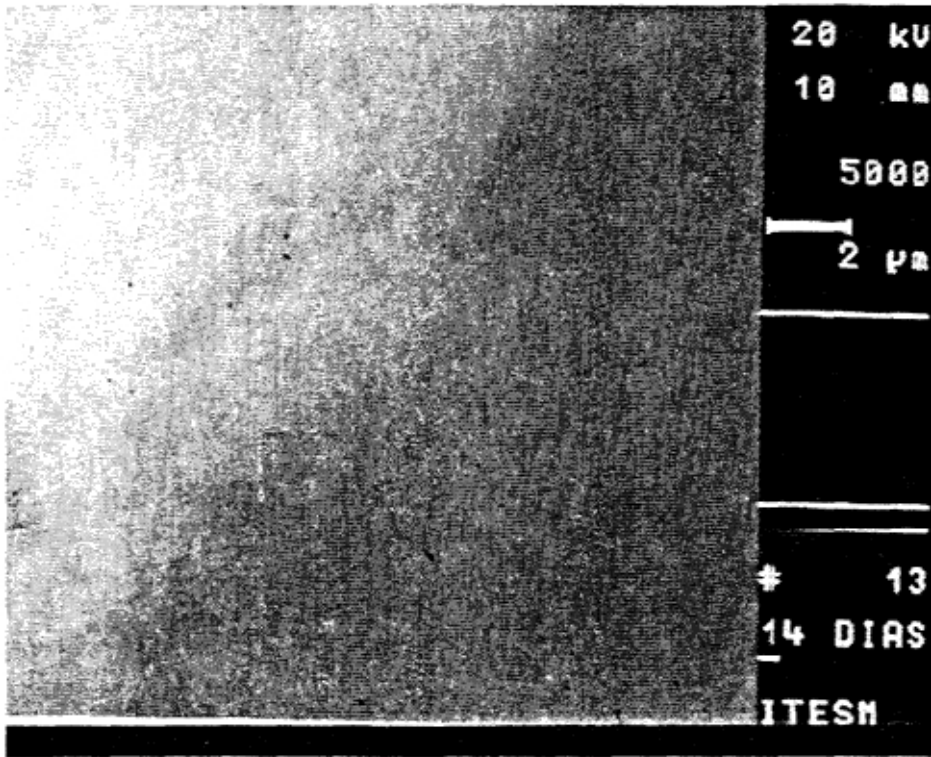


Imagen M8.23. Zona de transición de fases. Se observa claramente una frontera, no existe penetración del ataque, ni agrietamiento.

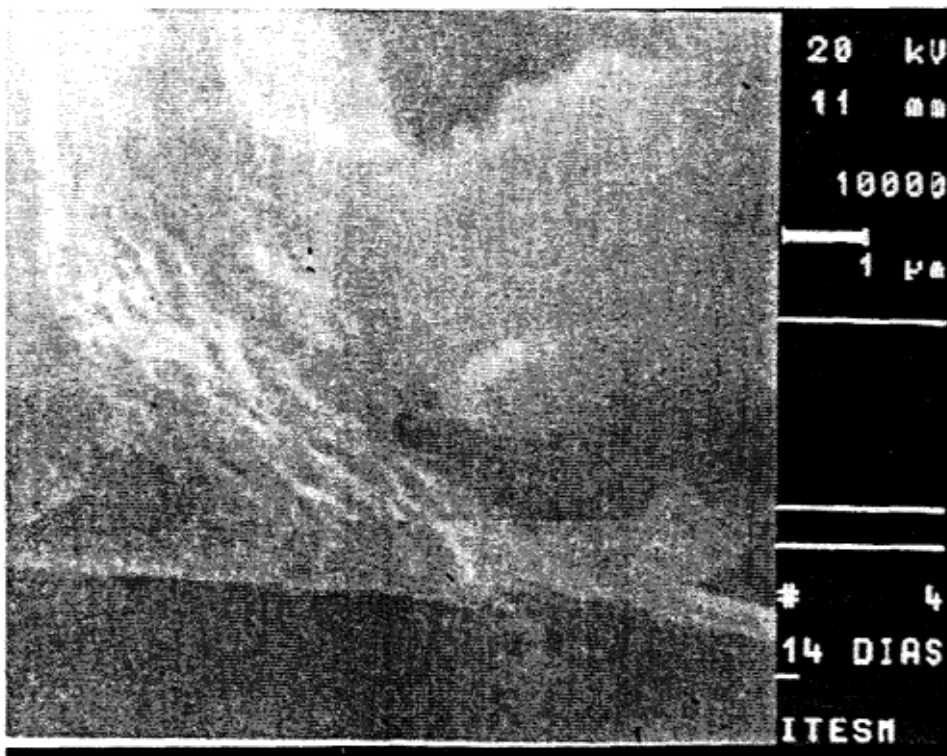


Imagen M8.24. Vista general de la muestra testigo. Morfología similar a la de las zonas sanas del resto de las muestras.

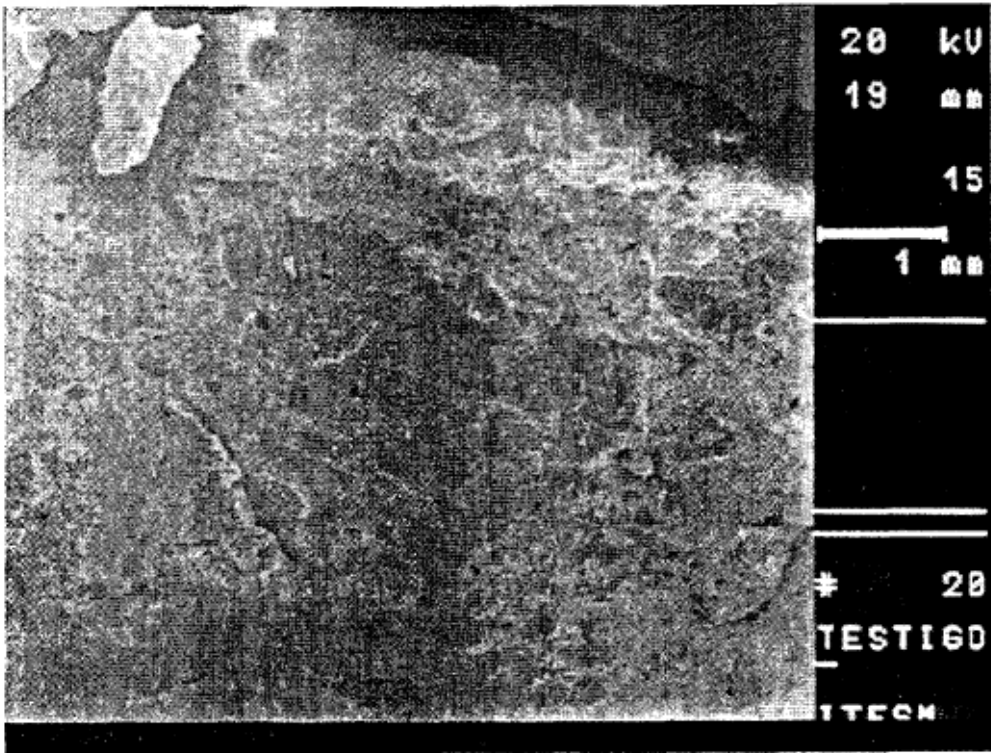


Imagen M8.25. Se observa una masa densa. Las zonas claras indican actividad puzolánica.

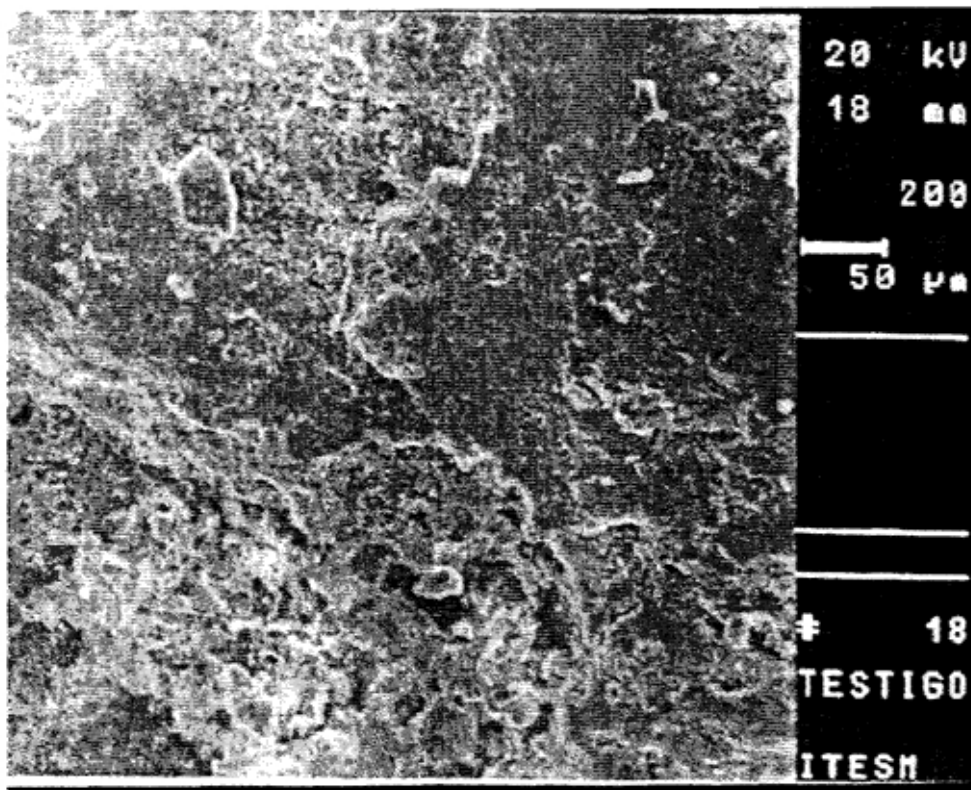
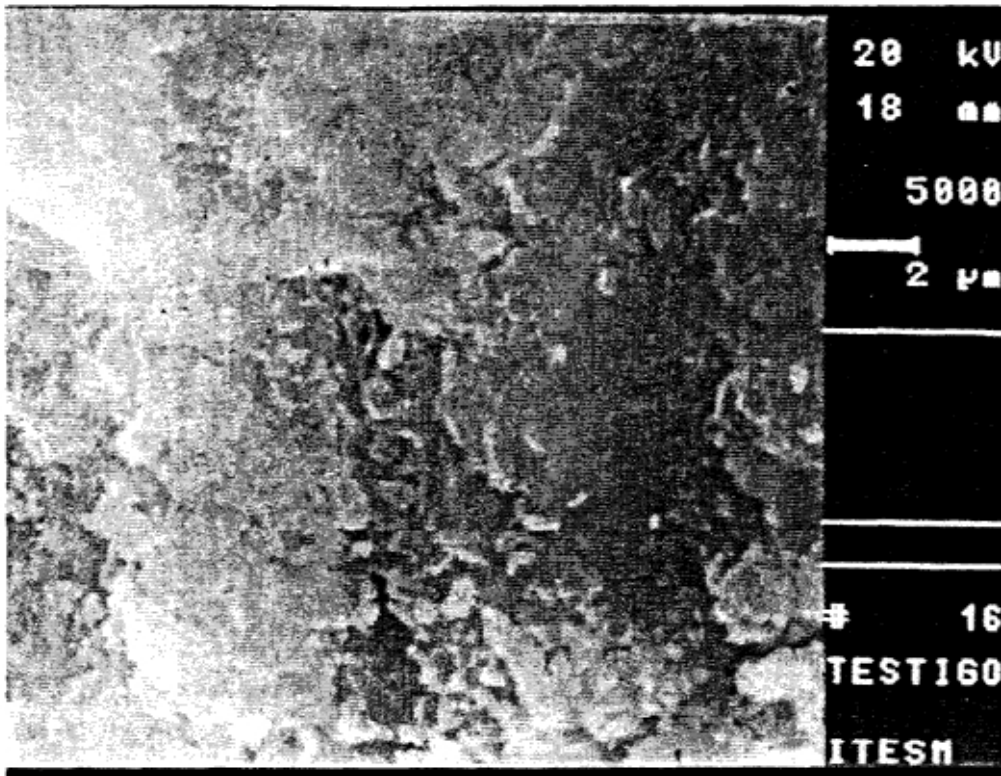


Imagen M8.26. Se aprecia una masa densa, sin capilares. Partículas de humos de sílice en proceso de reacción.



Referencias

-
- ¹ De Belie, Niele, et al. *Concrete attack by feed acids: Accelerated test to compare different Concrete Compositions and Technologies*. ACI Materials Journal. Noviembre-Diciembre 1997.

IX. Análisis de Costos del Concreto

A continuación se realiza el desarrollo del análisis de los costos de la elaboración del mortero de alto desempeño, y la construcción de un recubrimiento para piso con este material; la evaluación económica de la durabilidad del mortero de alto desempeño, constituye la segunda parte del presente estudio.

Con la aceptación generalizada y fundamental de que cualquier obra de ingeniería civil debe estar avalada por un estudio preciso de su costo, además que la cuantificación económica comúnmente es un factor de decisión sumamente dominante en la toma de decisiones ante diversas opciones, el carácter económico de nuestro mortero de alto desempeño también debe ser expresado.

En la realización del análisis de costos del mortero de alto desempeño utilizado, se debe considerar ciertos aspectos, especialmente en lo referente a los agregados, debido a que los mejores agregados para el presente caso no se encuentran en la región en forma comercial. Sin embargo, en el centro del país su explotación se hace en buena escala. Además, a esto hay que agregar el costo incurrido en la optimización de la granulometría para tener el diseño que se efectuó, así como la fabricación del mortero.

Comenzando el análisis con los *costos de los básicos*, se tendrían que hacer las siguientes consideraciones:

- El costo del basalto traído desde el centro del país es cuando mucho un 150% mayor que el precio de la caliza triturada que se vende en la región (aproximadamente \$100.00 / m³). Este factor se dedujo después de un sondeo informal vía telefónica entre diversas empresas transportadoras de carga de la región, considerando al estado de Puebla como el destino más lejano que se pudiera conseguir agregado. Cabe señalar que se encontró una dispersión bastante alta en el costo de los fletes, principalmente por el volumen a transportar.
- El costo del tamizado y su posterior optimización elevaría el precio en un 85% adicional. Este factor se obtuvo por medio de un sondeo informal vía telefónica con varias empresas de la localidad que se dedican al tamizado de materiales de cualquier tipo, y el servicio podría incluir el lavado de los agregados, además de su mezclado en seco.

Entonces, los costos de los ingredientes quedarían:

- Agregado (m³) = \$ 100.00 x (2.50 x 1.85) = \$ 465.50 m³
- Cemento Apasco Tipo I = \$ 65.00 saco 50 Kg = \$ 1,300.00 / ton.
- Aditivo Eucon 37 = \$ 24.17 litro
- Microsilice Eucon M.S.A. = \$ 10.55 Kg
- Agua = \$ 10.00 m³
- Placa vibratoria = \$ 20.00 / hr.

Tabla 9.1. Determinación del costo del mortero de alto desempeño

Para 1 m ³ del mortero diseñado			
INGREDIENTE	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	IMPORTE
Agregado	1,173.43 Kg	\$ 313.39 / ton.	\$ 367.74
Cemento Apasco Tipo I	694.40 Kg	\$ 1.30 / Kg	\$ 902.72
Aditivo Eucon 37	20.14 Lt.	\$ 24.17 / Lt.	\$ 486.73
MSA	208.32 Kg	\$ 10.55 / Kg	\$ 2197.77
Agua Reacción	153 Lt.	\$ 10.00 / m ³	\$ 1.53
Agua Absorción <small>Considerando las mismas características de H.O. y Absorción</small>	70.40 Lt.	\$ 10.00 / m ³	\$ 0.74
TOTAL			\$ 3957.23

Obviamente se está tratando de un producto sumamente costoso (aunque falta ver el costo de la solución que está usando actualmente la empresa en la planta), por lo que su fabricación debería ejecutarse por una empresa premezcladora que reuniera la suficiente capacidad técnica para llevarla a cabo.

Asumiendo que el sobre costo de la premezcladora sea de un 20% y su utilidad de un 25%, entonces se tiene el cálculo del costo del concreto de la siguiente forma:

$$\$ 3957.23 \times 1.20 \times 1.25 = 5935.85 / m^3$$

Para esto, cabe aclarar que los costos son obtenidos de algunas casas comerciales de la localidad, y son costos para clientes de menudeo. Por supuesto, estos precios pueden bajar

considerablemente cuando el concreto es fabricado por un premezclador, reduciéndose en por lo menos un 20%. Sin embargo, para este efecto se considera el costo antes calculado.

Tomando en cuenta, la construcción del recubrimiento con este mortero de alto desempeño en la planta, y con la finalidad de homologar la situación constructiva con la prevista en una cotización reciente del sistema actualmente empleado, se hacen las siguientes consideraciones:

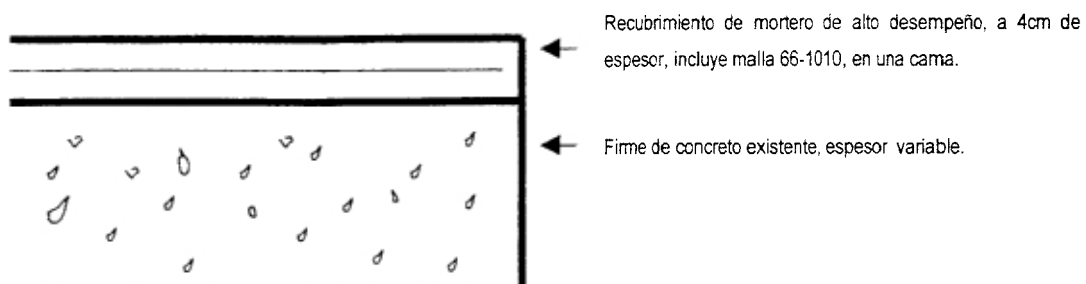
- La existencia de un firme de concreto de un cierto espesor que cumple con la función estructural, permite emplear el mortero de alto desempeño como un recubrimiento.
- Por la alta adhesión del mortero de alto desempeño, no es necesario el empleo de un aditivo adhesivo para concretos de diferentes edades. Además, la eventual diferencia entre módulos de elasticidad entre el mortero de alto desempeño y el concreto del firme existente se puede despreciar, dado que las cargas vivas, muertas y móviles no son lo suficientemente altas como para requerir un diseño estructural del piso.

Por otra parte, cualquier tipo de junta de construcción o de contracción, es una fuente potencial de filtraciones y acumulaciones del ácido entre los firmes, en la matriz del firme inferior y aún en las terracerías, lo que eventualmente podría dañar la cimentación, que por supuesto es de concreto, y que con seguridad es antigua, por lo que la tecnología que se empleó en el diseño de su concreto podría no ser avanzada, y posiblemente no se consideró el peligro potencial de la filtración de ácido.

Para evitar tales juntas, se consideró el empleo de:

- Malla electrosoldada con una cantidad de acero mínimo para contracción y temperatura, como el área provista por el diseño de malla 66 – 1010.
- Un espesor del piso de mortero de alto desempeño de 4 centímetros.

Figura 9.1. Croquis del sistema de piso.



Otro aspecto a evaluar en el análisis es la mano de obra, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- La superficie de la planta es aproximadamente de 324 m², según información de la cotización reciente del sistema actual.
- La cuadrilla suficiente para la construcción del firme sería de 1 albañil y 5 peones, por lo cual la construcción se llevaría a cabo en 2 jornadas.
- Entre los trabajos considerados se incluiría la limpieza, el habilitado y la colocación de la malla electrosoldada, la colocación de niveles, el colado del concreto, el compactado con placa vibratoria, el nivelado y acabado con regla por medios manuales, y el curado con humedad.

El costo de la malla electrosoldada en el mercado, en diseño 66-1010 oscila alrededor de los \$7.00 m², entonces para que el cálculo de la mano de obra, se obtiene el rendimiento de la cuadrilla:

$$324 \text{ m}^2 / 2 \text{ jornadas} = 162 \text{ m}^2 / \text{jornada}$$

Considerando el salario del albañil en \$ 70.00 por jornada, y el peón en \$ 40.00 por jornada, con factores de Salario Real de 1.71 y 1.76, respectivamente, además de un factor adicional por seguridad, mandos intermedios y herramienta menor, de 1.12, tenemos:

$$[(\$ 70.00 \times 1.71) + 5(\$40.00)(1.76)] \times 1.12 = \$ 528.30 / \text{jornada} = \$ 3.26 / \text{m}^2$$

El curado debe ser continuo, durante 14 días, ya sea por medio de inundación del área o por medio de mantas continuamente húmedas. Por este concepto se considera un costo de \$ 3.83 / m², que incluiría la mano de obra de un peón que efectuaría el curado y cuyo cálculo se presenta a continuación:

Salario real del peón = \$ 78.85 / jornada

Agua para curado = 3 lt / m²

Costo de M.O. para el periodo total de curado = $(78.85 \times 14 \text{ días}) / 324 \text{ m}^2 =$ \$ 3.41 / m²

Costo del agua = $(3 \text{ lt} \times 14 \text{ días}) \times (\$10.00 / \text{m}^2) =$ \$ 0.42 / m²

\$ 3.83 / m²

El cálculo del costo de la placa vibratoria, se muestra a continuación:

Costo preliminar de la placa vibratoria = \$ 20.00 x 8 horas = \$160 / día

Costo por unidad de área = \$ 160 x 2 días / 324 m² = \$ 0.99 / m²

El resumen del costo inicial del sistema de piso propuesto por m² sería:

• Mortero de alto desempeño premezclado	\$ 237.43
• Malla electrosoldada	7.00
• Mano de Obra (1 albañil y 5 peones)	3.26
• Curado	3.83
• Placa vibratoria	0.99
	\$ 252.51

Pero considerando un factor de sobre costo de 1.20 y una utilidad (antes de impuestos) de 20% para el contratista, se tiene que el costo final sería:

$$\$ 252.51 \times 1.20 \times 1.20 = \$ 363.61 / m^2$$

Ahora se mostrará el análisis de costos, considerando que el mortero se fabrica en la obra por medio de una revolvedora de gasolina.

Renta de revolvedora de 1 saco, 8 HP, a gasolina =	\$ 290.00/ día = \$ 36.25 / hr
Consumo de Gasolina =	\$ 7.50 / hr
Consumo de Lubricantes =	<u>\$ 1.20 / hr</u>
Costo horario de la revolvedora	\$ 44.95 / hr

M.O. para fabricación del mortero (1 albañil y 4 peones) = \$ 528.30 / jornada

Rendimiento de la cuadrilla = 13 m³ / jornada

Desperdicios para los materiales:

Agregado	\$ 367.74 x 1.05 =	386.13
Cemento	\$ 902.72 x 1.03 =	929.80
Aditivo	\$ 486.73 x 1.01 =	491.60
MSA	\$ 2197.77 x 1.01 =	2219.75
Agua	\$ 2.27 x 1.30 =	2.95
		\$ 4,030.23 / m ³

Costo del mortero fabricado en la obra =

$$\{[528.30 + 44.95 (8)] / 13\} + 4030.23 = \$ 4,098.53 / m^3$$

El resumen del costo inicial con esta alternativa de fabricación del mortero del sistema de piso propuesto por m² sería:

• Mortero de alto desempeño fab. en obra	\$ 163.94
• Malla electrosoldada	7.00
• Mano de Obra (1 albañil y 5 peones)	3.26
• Curado	3.83
• Placa vibratoria	0.99
	\$ 179.02

Realizando las mismas consideraciones del factor de sobre costo de 1.20 y una utilidad (antes de impuestos) de 20% para el contratista, se tiene que el costo final sería:

$$\$ 179.02 \times 1.20 \times 1.20 = \$ 257.79 / m^2$$

Cabe señalar que el cálculo no considera desperdicios de construcción, por la simplicidad del sistema, y que el insumo de uso más intenso es el mortero; las calzas para la malla electrosoldada se desprecian por su baja representación en el costo total del recubrimiento.

El sistema utilizado actualmente, y bajo una cotización de fecha reciente, es de \$ 750.00 / m² garantizado por 2 años.

Con respecto al análisis funcional de ambos sistemas se puede asegurar que es similar o casi idéntico. El sistema actual está basado en compuestos asfálticos, mortero de furán, juntas de expansión y una superficie de rodamiento a base de loseta industrial, y su tiempo de entrega es de 2 semanas, aclarando que no permite el tránsito de vehículos montacargas.

Sin embargo, éstos son los costos iniciales. Desde el punto de vista del inversionista, es mejor considerar cómo se distribuye la inversión en el tiempo y cuál será la duración efectiva de cada opción. Para esto, se efectuará un análisis del costo del ciclo de vida de cada sistema.

X. Análisis del costo del ciclo de vida del mortero de alto desempeño.

El análisis del costo del ciclo de vida, se realiza con la finalidad de proveer de una herramienta de tendencia económica al tomador de decisiones, y cuya información puede ser fácilmente interpretada por el inversionista, y sobre todo con este análisis se tiene un conocimiento relativo acerca de la distribución de los recursos en el tiempo. El análisis del costo del ciclo de vida sería una gran ventaja para la planeación de la gestión de los recursos, sobre todo cuando existen distintas partes involucradas en un proyecto, y su competencia o afectación en la vida del proyecto tienen periodos distintos de presencia, la cual puede ser recurrente, cíclica, continua o puntual, o aparecer solo una vez.

Un escenario semejante se presenta en la mayoría de las inversiones públicas en materia de infraestructura, cuya gestión en nuestro país se efectúa generalmente por todos los niveles de gobierno, e inclusive por los beneficiados (o perjudicados), y sus responsabilidades en cuanto a función, tiempo, y jurisdicción se definen previamente, o ya están establecidas en la ley.

La presencia de los recursos solo existe durante cierto momento político, por lo que una buena planeación de la gestión de recursos de acuerdo a la fuente disponible, seguramente que nos arrojaría una infraestructura con un financiamiento en cuanto a mantenimiento se refiere, de forma más continua, y que definitivamente se tendría una vida de servicio más prolongada. Sin embargo, cuando dichos tiempos políticos son muy cortos, y sobre todo la causa que les dio origen es muy inestable en cuanto a intensidad y longevidad, la estrategia para obtener una infraestructura más durable, sería el empleo de un material cuyo mantenimiento, reparación, y rehabilitación, se pudiera minimizar, o no fuera tan crítica para tener una calidad de servicio aceptable, tal y como lo es el concreto de alto desempeño, cuya durabilidad, que ya se ha comentado ampliamente, es muy superior al concreto normal que se ha venido empleando indistintamente por muchos años.

Si se retoma la hipótesis presentada en el primer capítulo de la presente tesis, cuyos antecedentes históricos la confirman, que el empleo del concreto ha estimulado el progreso en todos los ámbitos, y si éste ha sido un concreto de prestaciones con un nivel inferior al concreto de alto desempeño, se puede deducir de manera directa el impacto, de índole inclusive social, que tendría su empleo en forma masiva.

Con base a lo anterior, y dadas las condiciones actuales que presenta la infraestructura de nuestro país, se puede apreciar fácilmente que está llegando al término de su vida útil, y la mayoría ya ha

sobrepasado el nivel de calidad mínimo de servicio, de acuerdo con los estándares internacionales con los que algún día se habrá de homologar, es el momento propicio (incluso desde el aspecto político) para la inversión en una infraestructura durable.

Volviendo con el análisis del costo del ciclo de vida de los materiales de construcción, la información que emana de dichas apreciaciones ya ha sido considerada de mucho valor por la mayoría de las agencias del gobierno de E.U. y Canada (nuestros socios comerciales) que tienen competencia en el desarrollo de infraestructura, es la principal herramienta de toma de decisiones, inclusive la mayoría de los proyectos deben cumplir como estándares con ciertos parámetros obtenidos a través de un análisis del costo del ciclo de vida. ^{1, 2, 3, 4, 5}

Obviamente, las consideraciones que se establecen en el análisis del costo del ciclo de vida, son las que le dan la validez a los resultados; con un análisis de este tipo, se busca involucrar todos los factores que, de una forma u otra, tengan un beneficio o daño (valorado en unidades económicas) en el ciclo de vida del proyecto, además la estrategia del análisis permite la combinación de los factores para su agrupación en diferentes clases, de acuerdo con la información que se desea obtener considerando quién la va a interpretar.

A pesar de que existe otra serie de métodos de valoración económica de la vida de un proyecto, o del proyecto sin su distribución en el tiempo (Tasa interna de retorno, Análisis del punto muerto, Beneficio neto, etc.), se considera que el costo del ciclo de vida tiene un desarrollo mucho más sencillo, ayuda a identificar los costos más relevantes, y es más fácil de interpretar a través de su procedimiento de cálculo. Esta última característica es la más notable para este caso de estudio, dado que daría una representación más fiel acerca del comportamiento del mortero de alto desempeño, expresado en términos económicos. Además, se pueden apreciar mejor ciertas ventajas competitivas de los nuevos materiales, las cuales tenderían a disminuir el impacto que produce su costo inicial que suele ser más alto que el de otros materiales convencionales.

Dada la singularidad y abundancia de la información que presenta un análisis de costo de ciclo de vida, cada vez se extiende más su uso, sobre todo en aplicaciones de materiales de nueva tecnología en obras de infraestructura, apoyándose en otras herramientas ingenieriles de decisión, como estudios de ingeniería de valor, etc.; y a su vez, propician a la implantación de un nuevo esquema de clasificación de costos de infraestructura al tener una visión desde un punto de vista no tan puramente económico, sino que se le añaden factores de funcionalidad.

El costo del ciclo de vida se determina mediante el empleo de la siguiente fórmula 1:

$$VPCCV = CIC + VPCOMR + VPCD \quad (10.1)$$

Donde:

VPCCV = Valor presente del costo del ciclo de vida.

CIC = Costos iniciales de construcción.

VPCOMR = Valor presente de los costos de operación, mantenimiento y reparaciones.

VPCD = Valor presente de los costos de desecho.

Más aún, la expresión matemática que efectúa el descuento de costos futuros a valor presente, en un solo valor de CCV, se define como 1:

$$VPCCV = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+d)^t} \quad (10.2)$$

donde:

C_t = La suma de todos los costos incurridos en el tiempo t .

d = La tasa real de descuento para convertir los costos del tiempo t a costos en el tiempo 0.

T = El número de periodos de tiempo en el periodo de estudio.

Los pasos recomendados para calcular el CCV de un material de nueva tecnología para su comparación con un material convencional, son los siguientes:

1. Definir el objetivo del proyecto, y los requerimientos mínimos de desempeño.
2. Identificar las alternativas para alcanzar el objetivo.
3. Establecer las suposiciones básicas para el análisis.
4. Identificar, estimar y determinar el tiempo de desarrollo de todos los costos relevantes.
5. Calcular el CCV para cada alternativa.
6. Comparar el CCV de cada alternativa.
7. Considerar otros efectos del proyecto.
8. Seleccionar la mejor alternativa.

Claramente se puede apreciar que los dos primeros puntos ya se han estudiado y expresado ampliamente durante el estudio. Las suposiciones básicas para el análisis comprenden el comportamiento funcional del material y los aspectos financieros.

Dentro de las consideraciones que se pueden efectuar con respecto al sistema empleado actualmente en la planta, y en base a su periodo de garantía que es de 2 años, se podría estimar que inmediatamente después de éste periodo, se requiere el reemplazo del sistema en un 33% cada año, y que la duración promedio del reemplazo es de 3 años, de acuerdo con información proporcionada por la empresa base del caso de estudio. Por las mismas características del sistema de piso, para su reemplazo se debe retirar por completo la zona afectada e instalar un sistema nuevo en dicha zona. Entonces, los costos que se deben considerar en el reemplazo son: la demolición del piso, retiro, limpieza, y consecuentemente la instalación del nuevo piso. Por el concepto global de la demolición y disposición final del sistema de piso, se considera un costo unitario de \$ 24.00 /m², similar al del mercado.

Por otra parte, bajo la degradación máxima aceptable en el sistema propuesto a base del mortero de alto desempeño diseñado, y por las características del sistema, para rehabilitar el área primero se realiza una escarificación de una pequeña capa del espesor del piso, la cual es suficiente para garantizar una zona sana; esto se detecta por la coloración del mortero, puesto que en la zona de ataque la evidencia del deterioro de la superficie se identifica por los tonos claros casi blancos, y en la zona sana es de un color muy oscuro casi negro; luego aplicar otra capa del mismo mortero de alto desempeño, la cual también se compactaría y se curaría conforme a lo establecido; el espesor de tal capa se podría especificar de 10mm, por motivos de construcción. Los costos a considerar por la rehabilitación serían: el escarificado de la superficie, limpieza, y el procedimiento habitual de la instalación del firme de alto desempeño. El precio unitario en el mercado del escarificado con cepilladora de cerdas metálicas y la limpieza del área es de \$23.56/m², y el costo del recubrimiento a un espesor de 10mm es de \$ 47.44/m², el cual se detalla a continuación:

Mortero de alto desempeño fabricado en obra	\$ 40.99
M.O. recubrimiento (1 albañil + 5 peones)	\$ 1.63
Curado	\$ 3.83
Placa Vibratoria	\$ 0.99
	<hr/>
	\$ 47.44 / m ²

Entonces el costo de la rehabilitación es de \$ 71.00 / m². Además, para efectos de cálculo, se considera que el sistema alcanza la degradación máxima permitida en un año. Con respecto a esta suposición, se debe señalar que este dato es para efectos de análisis del ciclo de vida en la presente investigación, y que como ya se ha mencionado anteriormente, el verdadero modelo de predicción se debe desarrollar con el monitoreo sugerido en escala y en condiciones reales.

El cálculo de los costos de reemplazo/rehabilitación, se efectuaron con costos de insumos del tiempo presente; y para su proyección en el futuro, se emplearon los factores de ajuste (escalatoria) publicados por PEMEX en 1998 para obra civil. La selección de este tipo de factor de entre otros tales como los de la CNA, CFE, SCT, CAPFCE, se debió en parte a que el proyecto se puede considerar como construcción realizada en el sector industrial, específicamente en plantas donde se manejan materiales relativamente agresivos para las estructuras. Por estas razones se adoptó el factor de ajuste de 15.42% anual.

Por otra parte para considerar la depreciación del dinero en el tiempo, se adoptó la Tasa de Interés Interbancaria Promedio TIIP oficial del año de 1998, dado que esa sería la pérdida real de valor del dinero, expresado en la oferta de productos financieros. La TIIP para 1998 fue en promedio 26.42%.

Cabe aclarar que nuestro análisis se hace asumiendo que esta tasa se mantiene constante en el tiempo.

El horizonte para fines de este análisis se supondrá en 20 años, por ser éste el término mínimo de duración de los dispositivos industriales propios de la producción de la empresa.

Entonces, bajo las consideraciones anteriores, se realiza el análisis del costo del ciclo de vida, cuyo resultado se expresa a continuación:

Tabla 10.1. Costos considerados para el Ciclo de Vida, por metro cuadrado.

Concepto	Sistema de Mortero de Alto Desempeño	Sistema actual
Costos de Construcción / m ²	\$ 363.61	\$ 750.00
Costos de Construcción (fab. en obra)/m ²	\$ 257.79	
Costos de Rehabilitación / m ²	\$ 71.00	\$ -
Costos de Reemplazo Ponderado / año	\$ -	\$ 258.00

Tabla 10.2. Costo del Ciclo de Vida por metro cuadrado, considerando el premezclado del mortero.

Año	Sistema de Mortero de Alto Desempeño	Costo Presente	Escalación	Valor Presente Neto	Sistema Actual	Costo Presente	Escalación	Valor Presente Neto
0	Costos iniciales	\$ 363.61		\$ 363.61	Costos Iniciales	\$ 750.00		\$ 750.00
1	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 81.95	\$ 64.82	Reemplazo	\$ 258.00	\$ -	
2	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 94.58	\$ 59.18	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 343.70	\$ 215.06
3	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 109.17	\$ 54.03	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 396.70	\$ 196.34
4	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 126.00	\$ 49.33	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 457.87	\$ 179.26
5	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 145.43	\$ 45.04	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 528.48	\$ 163.66
6	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 167.86	\$ 41.12	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 609.97	\$ 149.42
7	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 193.74	\$ 37.54	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 704.02	\$ 136.42
8	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 223.62	\$ 34.28	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 812.58	\$ 124.55
9	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 258.10	\$ 31.29	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 937.88	\$ 113.71
10	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 297.90	\$ 28.57	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,082.51	\$ 103.82
11	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 343.84	\$ 26.08	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,249.43	\$ 94.78
12	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 396.85	\$ 23.81	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,442.09	\$ 86.54
13	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 458.05	\$ 21.74	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,664.46	\$ 79.01
14	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 528.68	\$ 19.85	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,921.12	\$ 72.13
15	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 610.20	\$ 18.12	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 2,217.36	\$ 65.86
16	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 704.30	\$ 16.55	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 2,559.27	\$ 60.13
17	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 812.90	\$ 15.11	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 2,953.91	\$ 54.89
18	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 938.25	\$ 13.79	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 3,409.41	\$ 50.12
19	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 1,082.93	\$ 12.59	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 3,935.14	\$ 45.76
20	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 1,249.91	\$ 11.50	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 4,541.94	\$ 41.78
			CCV	\$ 987.96			CCV	\$ 2,783.23

Tabla 10.3. Costo del Ciclo de Vida por metro cuadrado, considerando fabricación en obra del mortero.

Año	Sistema de Mortero de Alto Desempeño	Costo Presente	Escalación	Valor Presente Neto	Sistema Actual	Costo Presente	Escalación	Valor Presente Neto
0	Costos iniciales	\$ 257.79		\$ 257.79	Costos Iniciales	\$ 750.00		\$ 750.00
1	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 81.95	\$ 64.82	Reemplazo	\$ 258.00	\$ -	
2	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 94.58	\$ 59.18	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 343.70	\$ 215.06
3	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 109.17	\$ 54.03	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 396.70	\$ 196.34
4	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 126.00	\$ 49.33	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 457.87	\$ 179.26
5	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 145.43	\$ 45.04	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 528.48	\$ 163.66
6	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 167.86	\$ 41.12	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 609.97	\$ 149.42
7	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 193.74	\$ 37.54	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 704.02	\$ 136.42
8	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 223.62	\$ 34.28	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 812.58	\$ 124.55
9	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 258.10	\$ 31.29	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 937.88	\$ 113.71
10	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 297.90	\$ 28.57	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,082.51	\$ 103.82
11	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 343.84	\$ 26.08	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,249.43	\$ 94.78
12	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 396.85	\$ 23.81	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,442.09	\$ 86.54
13	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 458.05	\$ 21.74	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,664.46	\$ 79.01
14	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 528.68	\$ 19.85	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,921.12	\$ 72.13
15	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 610.20	\$ 18.12	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 2,217.36	\$ 65.86
16	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 704.30	\$ 16.55	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 2,559.27	\$ 60.13
17	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 812.90	\$ 15.11	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 2,953.91	\$ 54.89
18	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 938.25	\$ 13.79	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 3,409.41	\$ 50.12
19	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 1,082.93	\$ 12.59	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 3,935.14	\$ 45.76
20	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 1,249.91	\$ 11.50	Reemplazo	\$ 258.00	\$ 4,541.94	\$ 41.78
			CCV	\$ 882.14			CCV	\$ 2,783.23

Más aún, considerando que nuestras expectativas acerca del tiempo de ocurrencia de la degradación máxima aceptable en el sistema propuesto en base a mortero de alto desempeño fueran equivocadas, y el tiempo se redujera en un 50%, esto es, que la rehabilitación se tuviera que efectuar cada 6 meses, tenemos que:

Tabla 10.4. Sensibilidad con respecto al periodo de rehabilitación del sistema de mortero de alto desempeño, considerando su fabricación en obra, por metro cuadrado.

Meses	Sistema de Mortero de Alto Desempeño	Costo Presente	Escalación	Valor Presente Neto
0	Costos iniciales	\$ 257.79		\$ 257.79
6	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 76.28	\$ 67.84
12	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 81.94	\$ 64.81
18	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 88.03	\$ 61.93
24	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 94.57	\$ 59.17
30	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 101.60	\$ 56.53
36	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 109.15	\$ 54.01
42	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 117.26	\$ 51.60
48	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 125.97	\$ 49.31
54	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 135.33	\$ 47.11
60	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 145.38	\$ 45.01
66	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 156.19	\$ 43.00
72	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 167.79	\$ 41.09
78	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 180.26	\$ 39.26
84	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 193.65	\$ 37.51
90	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 208.04	\$ 35.84
96	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 223.49	\$ 34.24
102	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 240.10	\$ 32.71
108	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 257.94	\$ 31.26
114	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 277.10	\$ 29.86
120	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 297.69	\$ 28.53
126	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 319.81	\$ 27.26
132	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 343.57	\$ 26.05
138	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 369.10	\$ 24.89
144	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 396.53	\$ 23.78
150	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 425.99	\$ 22.72
156	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 457.64	\$ 21.71
162	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 491.64	\$ 20.74
168	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 528.17	\$ 19.81
174	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 567.41	\$ 18.93
180	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 609.57	\$ 18.09
186	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 654.86	\$ 17.28
192	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 703.52	\$ 16.51
198	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 755.79	\$ 15.78
204	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 811.95	\$ 15.07
210	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 872.28	\$ 14.40
216	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 937.09	\$ 13.76
222	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 1,006.71	\$ 13.15
228	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 1,081.51	\$ 12.56
234	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 1,161.87	\$ 12.00
240	Rehabilitación	\$ 71.00	\$ 1,248.19	\$ 11.47
			CCV	\$ 1,534.36

Sistema Actual	Costo Presente	Escalación	Valor Presente Neto	
Costos iniciales	\$ 750.00		\$ 750.00	
Reemplazo	\$ 258.00	-	-	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 343.65	\$ 215.00	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 396.62	\$ 196.27	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 457.75	\$ 179.17	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 528.29	\$ 163.56	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 609.71	\$ 149.31	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 703.68	\$ 136.30	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 812.14	\$ 124.42	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 937.30	\$ 113.58	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,081.76	\$ 103.68	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,248.48	\$ 94.65	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,440.90	\$ 86.40	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,662.97	\$ 78.88	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 1,919.27	\$ 72.00	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 2,215.07	\$ 65.73	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 2,556.45	\$ 60.00	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 2,950.46	\$ 54.77	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 3,405.18	\$ 50.00	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 3,929.99	\$ 45.65	
Reemplazo	\$ 258.00	\$ 4,535.68	\$ 41.67	
			CCV	\$ 2,781.04

Como se puede apreciar claramente, la solución con mortero de alto desempeño ha resultado tener un costo económico menor en el ciclo de vida, bajo los supuestos considerados. Sin embargo, la certeza de los costos se definirá en el futuro mediante el monitoreo de la degradación.

Ahora se presenta un análisis de sensibilidad, con variaciones en las tasa de TIIP y factor de ajuste, considerando la alternativa de la fabricación del mortero en la obra.

Tabla.10.5. Sensibilidad con respecto a la variación de las tasas de factor de ajuste y TIIP.

		TIIP anual en porcentaje								
Hecho en obra / Sistema actual		10	12	15	18	20	23	29	35	40
F A J U S T E n u a l	8	1435 / 4776	1248 / 4101	1041 / 3355	894 / 2826					
	10	1678 / 5652	1439 / 4790	1178 / 3846	994 / 3186	902 / 2853				
	13	2164 / 7412	1818 / 6161	1445 / 4810	1187 / 3881	1059 / 3420	913 / 2894			
	18	3475 / 12163	2826 / 9813	2139 / 7322	1678 / 5652	1454 / 4842	1203 / 3936	891 / 2816	717 / 2194	
	20		3425 / 11984	2545 / 8793	1960 / 6672	1678 / 5652	1365 / 4520	982 / 3140	772 / 2389	
	25			4074 / 14336	3004 / 10457	2499 / 8624	1947 / 6627	1295 / 4268	955 / 3044	788 / 2447
	30				4825 / 17062	3910 / 13743	2928 / 10181	1799 / 6091	1236 / 4056	971 / 3103
	35						4599 / 16243	2626 / 9086	1678 / 5652	1249 / 4101
	40							3997 / 14057	2384 / 8209	1678 / 5652

Tabla 10.6. Relación entre los dos sistemas bajo el análisis de sensibilidad.

		TIIP anual en porcentaje								
Hecho en obra / Sistema actual		10	12	15	18	20	23	29	35	40
F u n d a m e n t e	8	0.30055	0.30442	0.31028	0.31635					
	10	0.29689	0.30048	0.30629	0.31199	0.31616				
	13	0.29196	0.29516	0.30042	0.30585	0.30965	0.31548			
	18	0.28570	0.28799	0.29213	0.29689	0.30029	0.30564	0.31641	0.32680	
	20		0.28580	0.28943	0.29376	0.29689	0.30199	0.31274	0.32315	
	25			0.28418	0.28727	0.28977	0.29380	0.30342	0.31373	0.32203
	30				0.28279	0.28451	0.28759	0.29535	0.30473	0.31292
	35						0.28314	0.28902	0.29689	0.30456
	40							0.28434	0.29041	0.29689

Con la finalidad de aproximar los cálculos a la realidad, se propone un modelo de costo del ciclo de vida del sistema de piso basado en mortero de alto desempeño, que depende del parámetro pérdida de volumen, expresado como:

$$s = \frac{1.9 - A}{2(B - A)} + 0.5 \tag{10.3}$$

$$CCV = \sum_{s=0}^s \frac{Cs(1 + FE)^s}{(1 + TIIP)^s} \tag{10.4}$$

donde:

A = Pérdida del espesor del piso a 15 días de ataque del ácido (mm).

B = Pérdida del espesor del piso a 30 días de ataque del ácido (mm).

s = Predicción del periodo de servicio aceptable del piso, en términos de meses.

Cs = Costos incurridos en el tiempo s.

S = Números de periodos de tiempo en el periodo de estudio.

F.E. = Factor de escalación mensual expresado en decimales.

TIIP = Tasa de interés interbancaria promedio mensual expresada en decimales.

El desarrollo de este modelo se muestra a continuación:

1. Primero se asume que la relación lineal entre la degradación y el tiempo de ataque del ácido se mantiene.

2. Posteriormente, se establece la relación entre las mediciones A y B.

$$(B-A)/15 \text{ días}$$

3. Con la relación obtenida, y aplicando proporciones lineales, se realiza una proyección para obtener el tiempo X al que ocurre la degradación máxima permitida de 1.9mm.

$$(B - A)/15 \text{ días} = (1.9 - A)/ X$$

4. Después de la solución algebraica a la ecuación, se le tiene que sumar 15 días correspondientes al periodo que transcurre entre el inicio del ataque del ácido, y la medición A. La suma es el periodo de tiempo s.

5. Como este modelo se va a utilizar en la fórmula del costo del ciclo de vida, es necesario presentar los periodos de tiempo en meses, por lo cual los términos en días se dividen entre 30, con lo cual nos queda la ecuación final 10.3.

6. Con la información de la predicción de la vida de servicio, es sencillo aplicar la fórmula del CCV, integrando las operaciones necesarias para determinar el ajuste inflacionario y el valor presente neto.

Para un mejor desempeño y utilización de este modelo, sería necesario calibrarlo una vez que se haya experimentado en escala real, y optimizar su precisión basándose en estudios estadísticos.

Con esta determinación, se puede asumir que el estudio ha sido suficiente para efectos de la presente tesis en cuanto a la evaluación del ciclo de vida del producto se refiere. Sería la empresa quien tomara la decisión de optar por tal o cual sistema, una vez que haya efectuado una prueba piloto con nuestro sistema.

Dentro de los parámetros a considerar por la empresa, obviamente destaca el observar la productividad que se gana por la continuidad de sus procesos industriales cuando los procedimientos de reparación y/o rehabilitación se simplifican.

Referencias

- ¹ Ehlen, Mark A; Marshall, Harold E. ***The Economics of New-Technology Materials: A Case Study of FRP Bridge Decking.*** NIST Report NISTIR 5864. Julio 1996.
- ² Singh, Balaram. ***How significant is LCCA?*** Concrete International. Octubre 1996.
- ³ Ehlen, Mark A. ***Life-Cycle Cost of new construction materials.*** Journal of Infrastructure Systems. Diciembre 1997.
- ⁴ Fletcher, Jim. ***Project outline and economic analysis: West River East Side Bridge, Pictou County, Nova Scotia.*** Technology Transfer Day. The specifications and use of HPC. Concrete Canada. Octubre 1997.
- ⁵ Frohnsdorff, Geoffrey. ***Predicting the Service Lives of Materials of Construction.*** Materials for the new millennium. Proceedings of the 4th Materials Engineering Conference. Noviembre 1996

XI. El Concreto de Alto Desempeño y su Impacto en el Desarrollo Sostenible.

A pesar de que las políticas del Desarrollo Sostenible cada vez hacen más presencia en las diversas industrias, la situación de la industria de la construcción al respecto es un caso aparte.

Es indudable que no se ha medido el aspecto sustentable de la industria de la construcción en todos los aspectos que involucra, y a lo largo de su ciclo de vida.

Los objetivos que persiguen las políticas de Desarrollo Sostenible, principalmente es el ahorro de energía y otros recursos, en función de ciertas dimensiones presentes en la biósfera (económica, ecológica, tecnológica, y social) ; sin embargo, nuestra interpretación es lograr la máxima eficiencia de cualquier actividad para que su impacto ambiental sea el menor posible, no en el corto plazo, sino aún después de que ha terminado su vida útil.

A pesar de que la sostenibilidad siempre estará severamente influenciada por muchos factores en el medio en que se presume desarrollar, incluyendo factores tales como el nivel cultural y educacional, que no nos permiten observar que el problema no es regional, ni está en función de fronteras o idiomas, sino que es un problema global que nos afecta (y seguirá afectando) a todos, y visto desde una mejor perspectiva, está en función de nuestra manera de vida. Sin embargo, consideramos que pueden existir soluciones que no alteren tanto nuestra manera de vida, ni que requieran el consumo excesivo de materiales reciclados, o que muestren una imagen de retroceso tecnológico. Una de estas soluciones es el consumo de Concreto de Alto Desempeño; pero aún es un material en sus primeras edades, y es necesario desarrollar más su tecnología, con la finalidad de diseminarla con confiabilidad.

Uno de los constituyentes principales del Concreto de Alto Desempeño es el cemento. Para fines ambientales, las empresas cementeras han tenido grandes avances en cuanto a mejoras tecnológicas en sus procesos productivos ¹, para reducir sus emisiones, disminuir el consumo de combustible, y también para apoyar la investigación en materia ambiental en otras áreas, aún y cuando la industria cementera no es un gran productor de emanaciones dañinas al ecosistema ², cuando se le compara con otras industrias mucho más contaminantes.

Sin embargo, todavía se sigue produciendo de 0.8 a 1 tonelada de CO₂ por tonelada de clinker para el calentamiento del horno ³; aunque impropriamente se asegura que esa tonelada de CO₂ presente en la atmósfera después se fija en el concreto por efecto de la carbonatación, pero es perfectamente

cuestionable que vaya a poder penetrar en pocos años en concretos altamente impermeables, o en zonas donde no exista un agente de penetración; además se libera cierta cantidad de NO_x producido por las altas temperaturas que se alcanzan en el horno, y SO_2 contenido principalmente del combustible usado en el horno. Si se efectúa un análisis global acerca de los principales emisores de CO_2 , la mayor parte de productores se encuentran en la industria de la transportación, y en otros usos de combustibles fósiles. Pero aunque la industria del cemento no sea tan contaminante (cabe aclarar que esto es en términos relativos), es obligación de todos los que habitamos en este planeta ajustar nuestros procesos en mejora del ambiente, que a su vez repercutirá en la preservación de los recursos naturales, un mejor desempeño funcional del ecosistema, y sobre todo tendrá un impacto sumamente notable en la salud humana.

Sin embargo, si se considera que el concreto es el material más extensamente usado en el mundo, y también que por su dependencia, la sociedad no se desarrollaría tan fácilmente si se restringe su uso, entonces es drásticamente relevante el desarrollo de la eco-eficiencia en la industria cementera, y aún más en la industria concretera.

Afortunadamente, el contenido de cemento en una mezcla de concreto puede ser sustituido gracias a los avances de la tecnología del concreto, por puzolanas artificiales, como aditivo mineral, como es el caso de la ceniza volante, la escoria de alto horno pulverizada y la cáscara de arroz, hasta en proporciones del 60% o más, dependiendo de las características del aditivo mineral, y con esto se contribuiría al consumo de un subproducto. Además se obtiene un concreto con prestaciones superiores, en la inmensa mayoría de los casos, al concreto normal, y si se considera que se trata de la utilización de un producto de desecho, se esperaría que fuera un producto más económico.

Como una investigación paralela a la presente, se está estudiando el comportamiento físico de un concreto elaborado con cemento Portland, agua, superplastificante, y como agregado un material producto del reciclaje de carpeta asfáltica y base, y cuyos resultados hasta el momento han sido satisfactorios, considerando que se han obtenido resistencias a la compresión de 20 MPa a los 14 días, solo efectuando pequeños ajustes en la granulometría; dentro de estos programas de investigación de nuevos productos en base al reciclaje de materiales, lo más importante es encontrar el mercado de aplicación del material de acuerdo a sus características, y desarrollar la transferencia de tecnología dentro de un esquema práctico.

Ya en materia de producción de concreto, se puede decir que se trata de un material que presenta muchas ventajas ecológicas:

- Se produce con materiales naturales.
- En su producción y uso no se emiten sustancias venenosas o letales ⁴.
- La energía consumida en su producción es bastante pequeña en comparación con otros materiales de construcción ⁴, y sus ingredientes se encuentran casi en cualquier parte.
- Cuando se emplea en edificación bioclimática, su elevada masa térmica puede ser aprovechada exitosamente. Precisamente en materia de edificación, la orientación de puertas y ventanas, y sus proporciones, tiene una influencia mucho mayor en el consumo de energía en el ciclo de vida, dado que la energía consumida⁴ en su proceso de construcción es de solo el 8%.
- Es un material altamente reciclable, y esta característica es la que tiende a nivelar su balance ecológico.
- Inclusive las reparaciones en estructuras de concreto pueden efectuarse de modo sostenible. ⁵

En el plano del concreto de alto desempeño, se deben hacer otras consideraciones. La principal es la longevidad que se alcanza en las estructuras de concreto de alto desempeño, muy por encima de la duración de una estructura con concreto normal. Esto indica que el consumo de concreto se debe reducir conforme se propicie el consumo masivo de concreto de alto desempeño, puesto que las labores de reconstrucción o reemplazo de estructuras tenderá a disminuir. Esto se llama optimización de los recursos.

Basándose en el mismo aspecto durable del concreto de alto desempeño, si se coloca en un escenario de una vía terrestre de comunicación (puentes, carreteras, avenidas) que requiere reparación/ rehabilitación a periodos muy frecuentes, tal y como abundan en nuestro medio, y que las fallas que presentan son por una baja calidad de sus materiales, se podría ver la pérdida de horas-hombre que se consumen en la labor de reparación/ rehabilitación, pero serían más las que se pierden por demoras causadas a los usuarios. Lógicamente el consumo de combustible de los vehículos tiende a aumentar, y la eficiencia de su combustión se reduce, a la vez que las emisiones se concentran en una zona; y también el consumo de los materiales se incrementa para la vida de la estructura. Ahora si trasladamos el mismo escenario a una situación donde el material empleado en las vías terrestres es concreto de alto desempeño, se encuentra una estructura más segura y duradera, cuyos intervalos de reparación/rehabilitación se prolongan tanto, que su impacto ecológico directo y colateral disminuye sustancialmente. Si a esto se le agrega que, un camión puede ahorrar cerca de un 20% de combustible cuando transita en un camino con pavimento de concreto, en comparación cuando el pavimento es de

asfalto ², entonces se está ante un nicho de mercado de considerables proporciones, tal sólo por el aspecto de la eco-eficiencia; y aún más si se toma en cuenta que el 83% de la energía consumida en vías terrestres de comunicación le corresponden al consumo de combustible por los vehículos en tránsito, y a la construcción de la estructura de la vía el 3% ², entonces se estaría en la posición de contar con la reserva de energía para construir un poco más de 5 caminos iguales de concreto. Ante estas últimas observaciones, es obvia la gran ventaja que presentan los sistemas carreteros en base a concreto de alto desempeño, sobre los sistemas en base a concreto asfáltico, tan solo en evaluaciones energéticas, por lo cual es altamente recomendable cambiar nuestras prácticas de emplear pavimentos de asfalto, por pavimentos de concreto de alto desempeño, tal y como lo están haciendo nuestros socios en el Tratado de Libre Comercio.

Otro aspecto que impulsaría a desarrollar la investigación del concreto de alto desempeño, por cuestiones de sostenibilidad, es el hecho del desperdicio de se produce por la deficiente utilización del concreto. Esta situación, ya ha sido resumida con anterioridad:

- Existen muchos lugares, como nuestro país, donde se fabrica concreto de bajas resistencias (15-25 MPa), que se presenta por el bajo perfil que se requiere para cumplir propósitos estructurales, que resulta no solo en desperdicio de cemento, sino también en un incremento en el agotamiento de agregados ².
- El concreto no se está empleando de la manera más eficiente desde el punto de vista del desarrollo sostenible, ni desde el punto de vista económico ².
- La globalización de una tecnología bien desarrollada que se emplea actualmente solo en ciertas latitudes, resultará en un uso más eficiente del cemento y de los agregados ³.
- El impacto en el ambiente del uso del concreto es considerablemente pequeño cuando se le compara con otras actividades humanas ⁴.
- El empleo de un cemento, con un tamaño de partículas relativamente grueso, que requeriría de menor tiempo de molienda durante su fabricación, y que por tal motivo se ahorraría cierta energía, produciría una matriz de cemento más susceptible de completar su hidratación, lo cual lo hace de un potencial uso para el concreto de alto desempeño ⁶.

Un factor más, que señala las ventajas tanto económicas como ecológicas, que se pueden presentar mediante el empleo del concreto de alto desempeño, es el ahorro de cemento y de agregados

que se produce con la reducción de la sección de elementos estructurales para un mismo comportamiento estructural, incrementando a la vez el espacio utilizable de la estructura. Una vez que la estructura haya completado su vida útil, ya sea desde el punto de vista social-económico, o por su estado patológico, y sea necesaria la demolición, el concreto producto de la demolición podrá emplearse confiablemente varias veces como agregado reciclado en concreto de medianas resistencias para propósitos estructurales ^{7, 8}, antes de formar parte de bases en caminos.

Para fines de nuestro caso de estudio, se hace patente que nuestra solución, por su proceso constructivo y de rehabilitación, tiene grandes mejoras con respecto al sistema actual, en términos de sostenibilidad, dado que el desperdicio del material solo se produce por la escarificación previa a la rehabilitación, mientras en el otro sistema la demolición se hace por completo, y por la degradación y contaminación que presenta el material, su reuso o reciclaje para otros fines sería objetable. Aunque se desconoce el consumo energético para la elaboración de los materiales del sistema actual y su aplicación, se considera que sólo la loseta consume más energía que el mortero reforzado empleado, basándose en información de la tabla 11.1.

Tabla 11.1 Comparación de parámetros de eco-eficiencia entre algunos materiales de construcción. ⁴

Propiedades	Acero	Vidrio	Ladrillo	Block de concreto	Madera	Concreto Reforzado
Resistencia f, MPa	240	30	7.5	7.5	14	13.5
Cost/m ³ (índice)	100	47	3.4	2.3	5.8	2.0
Costo / f	0.42	1.57	0.45	0.13	0.41	0.15
Energía, GJ/m ³	236	56	11	4.9	2.4	6.3
Energía / f	0.98	1.87	1.48	1.65	0.17	0.47
SO ₂ , kg/m ³	14	3.2	1.8	0.4	-	1.0
SO ₂ / f	0.06	0.11	0.24	0.05	-	0.07

Referencias

- ¹ ***Climate Change, Cement, and the EU***. CEMBUREAU. Julio 1998.
- ² ***Aïtcin, Pierre-Claude, et al. The future of cement and concrete industry according to a sustainable development approach***. WABE International Symposium on Cement and Concrete. Mayo 1998.
- ³ ***Aïtcin, Pierre-Claude, et al. Present use of cement and concrete***. WABE International Symposium on Cement and Concrete. Mayo 1998.
- ⁴ ***Penttala, Vesa. Concrete and Sustainable Development***. ACI Materials Journal. Septiembre-Octubre 1997.
- ⁵ ***Brander, Merle E. Making Design and Construction Sustainable***. Concrete International. Agosto 1997.
- ⁶ ***Bentz, D.P., et al. An argument for using coarse cements in high performance concretes***. Aceptado por Cement and Concrete Research para su publicación en 1999.
- ⁷ ***Tavakoli, Mostafa, et al. Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete***. Concrete International. Noviembre 1996.
- ⁸ ***AbouRizk, Simaan, et al. The Properties of Recycled Concrete***. Concrete International. Julio 1997.

XII. Conclusiones.

Cuando se inició la presente investigación, hace prácticamente 15 meses, uno de los factores que se deseaba demostrar, era precisamente la expresión en términos económicos del comportamiento de una estructura fabricada con concreto de alto desempeño, lo cual debería estar fundamentado, para lo cual se trató de comprobar con diversas publicaciones y documentaciones, ya debidamente señaladas en el texto de esta tesis. Pero aún sin considerar este hecho, si se analiza cuáles son los factores de peso que consideran las personas con poder de decisión, encontramos que el aspecto económico, y más la relación costo/beneficio en la inmensa mayoría de los casos, es el factor decisivo que se mantiene constante a lo largo de todo el proceso de toma de decisiones, hasta llegar a ser el único parámetro de decisión. Y lógicamente, llega a ser el parámetro que casi todos entienden, por lo cual la expresión económica es vital para cualquier evento que se quiera referir, y aún más para los materiales de nueva tecnología.

Una de las partes fundamentales de esta investigación era impulsar al desarrollo regional del concreto de alto desempeño, y aunque en el estudio se consideró un agregado de la región, también existen otros agregados de muy buena calidad, como una dolomita que ya se explota desde hace algún tiempo, pero no para fines de producir agregados para concreto.

Dentro del desarrollo de la investigación, se encontró que, en el aspecto teórico, el concreto de alto desempeño se está desarrollando vertiginosamente, aún en países donde los consumos de concreto no son tan altos; sin embargo, la investigación que se realiza en esta materia ha sido tan fructífera, que después de trabajar en programas nacionales de investigación para el desarrollo del concreto de alto desempeño, estos países ahora exportan la transferencia de tecnología con mucho éxito, y sobre todo motivados por la gran demanda existente de conocimientos sobre el tema, por países que ya han apreciado las altas prestaciones brindadas a la infraestructura.

Cuando se inició la búsqueda de los agregados, de acuerdo a los requerimientos que exigía el caso de estudio presentado, se pudo constatar que no existía la operación comercial de banco alguno de basalto, y al observar la extensión y las condiciones del banco localizado, es sorprendente la facilidad con la que se podría desarrollar su explotación, ya que las rocas, por su mismo origen, se encuentran dispersas en el campo, por lo que, para su explotación no se requeriría una extensa inversión en materia de infraestructura, como la presentada usualmente en la explotación de mantos rocosos como la caliza extraída abundantemente en la localidad.

La selección del caso de estudio se debió, en parte, a las facilidades otorgadas por la empresa para el desarrollo de la investigación, además, que el ataque por ácidos en el concreto es un caso de durabilidad sumamente drástico, que aunque se encuentra presente en muchos casos (pero en menor medida en tuberías de concreto, otro tipo de instalaciones industriales, granjas, etc.), no se ha investigado lo suficiente como para asentar, de manera precisa, cuáles serían los parámetros de formulación de una mezcla de concreto, o de sus ingredientes.

En el plano de los resultados de la experimentación, se puede concluir en varios aspectos. Uno de ellos se refiere al comportamiento observado en el mortero de alto desempeño, puesto que, de acuerdo a la teoría, se considera una durabilidad considerablemente mayor a la que presentó. De acuerdo a los diversos análisis efectuados, se pudo apreciar que la actividad puzolánica todavía estaba en proceso cuando se inició el periodo de ataque del ácido, como lo demuestra el impresionante aumento en la resistencia a la compresión entre los especímenes testigo inicial y final, por lo que debieron estar presentes muchas fases de calcio durante el ataque, especialmente hidróxido de calcio; aunado a esto, se observó plenamente la existencia de muchos huecos producidos por el aire atrapado durante el mezclado, generado por efectos de la alta viscosidad que presentó la mezcla, los cuales, en el estado fresco del mortero, tienden a ser llenados con agua por la presión que se ejerce sobre las paredes de la burbuja, que indudablemente trae como consecuencia una hidratación no homogénea del cemento, esta agua propicia posteriormente cierta concentración de la actividad puzolánica. Se considera, que estos detalles pueden ser resueltos fácilmente con un agitado más vigoroso durante el mezclado, y la compactación propuesta al construir el sistema de piso propuesto.

Además, es destacable el buen comportamiento mostrado por el basalto, por lo que el paso a seguir sería maximizar su proporción dentro de la mezcla. Para fines reológicos, esto llevaría a reducir significativamente su tamaño máximo; sin embargo, con el modelo de suspensión de sólidos usado, se tiene una gran herramienta para lograr la máxima compacidad posible en una distribución de agregados, tal y como se pudo comprobar en el diseño de la granulometría.

Con respecto al comportamiento de los humos de sílice, es evidente que el mezclado no fue lo suficientemente intenso como para desintegrar los granos de microsílíce; sin embargo, la secuencia de mezclado fue la óptima para cumplir de la manera más eficiente con este objetivo. Cabe señalar que la dosis de humos de sílice empleada, no es garantía por sí misma, para tomar todo el hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento, sino que es un proceso influido por el tiempo de maduración de los productos de hidratación; formación, tamaño, cantidad y distribución de los cristales de hidróxido de calcio;

y de la velocidad de la actividad puzolánica, que además de estar en función del tiempo, requiere de cierta humedad, la cual no siempre está disponible.

Es necesario ajustar el contenido de humo de sílice a fin de eficientar el uso del material, tener menos cantidad de partículas sin reaccionar, y disminuir el costo del mortero, ya que es el costo directo más alto, representando el 55% del costo total de los ingredientes, por lo que cualquier disminución en el contenido contribuirá a bajar el costo final del mortero.

Por la serie de tomas microscópicas, y el intenso rastreo previo de las muestras, se puede concluir que, para esta relación agua-cemento prácticamente no existe formación de capilares o macroporos. Aún en las magnificaciones más altas, no existía porosidad objetable, por lo que los resultados de porosidad obtenidos deben ser más sujetos de las características del agregado, el cual a pesar de tener una formación bastante densa, presentaba muchos huecos que podrían estar interconectados en el agregado, además de que se observa cierta porosidad en la interfase.

En la zona de ataque, como se esperaba, ocurrió una disolución de los compuestos de calcio, originando una severa porosidad, debilitando la microestructura hasta el punto en que se desintegraba paulatinamente; esto aparentemente no sucedía por penetración. Por lo tanto, es recomendable seguir curando el mortero por un periodo más prolongado para que la actividad puzolánica continúe a la misma velocidad, dado que indudablemente se puede incrementar más, puesto que en algunas de las tomas microscópicas se aprecia la fijación en proceso de compuestos de calcio. Otra opción sería el curado con vapor, o el curado en autoclave, que proporcionaría un mortero de mayor calidad; sin embargo, para el caso de estudio presentado se tendría que combinar con otros productos o sistemas, dado que se formarían muchas juntas (detalle constructivo que se ha tratado de minimizar). Pero queda la opción de emplearse en prefabricados, como tuberías de concreto, que por su manejo pueden ser susceptibles de recibir un curado especial.

Retomando la mecánica de degradación, y relacionándola con los supuestos en que se basa este modelo de predicción, es válida la consideración de que la pérdida de volumen tiene una relación lineal con el tiempo, hasta cierto nivel de degradación, donde se incluye el máximo permisible, puesto que si la pérdida se realiza en capas muy delgadas, pero de manera continua, sin agrietamiento progresivo, aparentemente nunca se tendrá una pérdida súbita de material por agrietamiento, seguida de un colapso generalizado.

Para la plena identificación del compuesto que se forma en la zona de ataque, y la proposición de algún cambio a la mezcla de concreto, es necesario realizar un análisis cuantitativo de difracción de rayos X. De esta manera, se tendría la imagen completa de lo que está sucediendo a nivel microestructura, y la posibilidad de encontrar una solución más eficiente basada en cemento Portland.

Tomando en cuenta el aspecto económico, se considera que la relación directa establecida entre el modelo de costo de ciclo de vida, y el comportamiento del sistema de piso de alto desempeño, se encuentra bien fundamentado, puesto que aunque se mostraron ciertas evaluaciones en el presente estudio, la experimentación, en escala real, definirá en forma más precisa el CCV, mediante un monitoreo que puede llevarse a cabo fácilmente mediante la medición del cambio de peso de ciertas áreas a discreción de la empresa. Además, se indica dentro del mismo modelo el impacto del estado financiero y las tendencias macroeconómicas en la estructura, y en diversas proporciones, puesto que el factor de ajuste (escalatoria) no siempre guarda la misma proporción que la tendencia inflacionaria, financiera, cambiaria, o bursátil; y se considera este factor de ajuste lo suficientemente representativo para los fines de esta investigación, puesto que un análisis más complejo requeriría de la observancia del comportamiento económico de los diversos ingredientes del mortero y de la construcción del sistema de piso; la mayor parte de los primeros cotizados en unidades económicas internacionales, y los segundos con un comportamiento sumamente caprichoso, pero con seguridad menor que la inflación nacional.

Como ya se indicó, la tecnología del concreto de alto desempeño tiene ciertas virtudes de gran impacto en el desarrollo sostenible, por lo cual, se tiene un incentivo más para que su uso sea generalizado, y aún en sustitución de otros materiales de construcción. La consciente y precisa aplicación del concreto en algún uso requerido, deberá tener un intenso estudio previo de las características de exposición, para lograr la aplicación más eficiente del material.

Dentro del trabajo futuro queda la optimización de la mezcla, la identificación del compuesto producto del ataque del ácido en el mortero, y la ratificación o rectificación de los modelos de predicción y costo del ciclo de vida, además de un análisis más preciso de la ecoeficiencia del sistema empleado.

Tema

Diseño de un concreto de alto desempeño para su exposición en un ambiente ácido, predicción de su vida útil y análisis del costo de su ciclo de vida.

Introducción.

El concreto es el material fabricado por el hombre con más amplio uso, y el segundo después del agua como la substancia más consumida de forma intensa, produciéndose aproximadamente una tonelada de concreto para cada ser humano en el planeta.

El concreto se emplea en todos los tipos de construcción, incluyendo algunas aplicaciones muy especializadas como túneles, estructuras marinas, etc. e indiscutiblemente como el material de las cimentaciones de todas las estructuras; su empleo continuará por tiempo indefinido porque no se ha encontrado una alternativa más barata y con una eficiencia similar.

Sin embargo, el concreto presenta frecuentemente ciertos problemas en su funcionamiento en las estructuras de construcción tales como una baja durabilidad, la cual es el resultado de una omisión del conocimiento de ciertos factores que la afectan (como el intemperismo, la abrasión, ataques de líquidos o gases naturales o industriales, permeabilidad, condiciones ambientales, etc.); o la mala aplicación de tales conocimientos.

Últimamente ha surgido un nuevo material de construcción denominado Concreto de Alto Desempeño o de alto comportamiento (High Performance Concrete, HPC), que se define según una propuesta del Comité en Concreto de Alto Comportamiento del Instituto Americano del Concreto (ACI), como *un concreto que cumple con requerimientos especiales de comportamiento, los cuales no siempre pueden ser alcanzados rutinariamente usando sólo constituyentes convencionales y procedimientos normales de mezclado, colocado y curado. Estos requerimientos pueden involucrar incrementos o mejoras de lo siguiente:*

- *Facilidad de colocación y compactación sin segregación.*
- *Propiedades mecánicas en el largo plazo.*

- *Resistencia a edades tempranas.*
- *Dureza.*
- *Estabilidad volumétrica.*
- *Vida en medios ambientes severos.*

Por sus características, es necesario que el concreto de alto desempeño se desarrolle cada vez más, hasta alcanzar un uso generalizado, y como consecuencia se tendrían estructuras más seguras, habitables, con escasos periodos de mantenimiento y un incremento notable en su vida útil, así como en el nivel de vida de la sociedad presente en su entorno.

Una manera de cuantificar los beneficios que brinda, es por medio de un estudio económico, que considere aspectos técnicos como su producción, factibilidad de producción en altos volúmenes, integración en el proceso constructivo, y análisis de la inversión con respecto al ciclo de vida y el ahorro en mantenimiento y reparaciones.

Planteamiento del problema.

La construcción en todo el mundo enfrenta problemas de todo tipo, como la crisis energética, recursos naturales limitados, implementación de sistemas de protección al medio ambiente, programas de apoyo al desarrollo sostenible, y el uso coercitivo más eficiente y seguro de los materiales. Para cumplir estos objetivos es de suma importancia modernizar el conocimiento de los materiales para predecir su vida bajo diversas condiciones ambientales¹.

El rápido y disperso desarrollo de la tecnología de concreto ha contribuido de gran manera a demostrar que la durabilidad del concreto es de gran importancia por los diversos efectos destructivos del ambiente y con las consecuentes pérdidas económicas debidas a una baja durabilidad².

Anteriormente se aceptaba la hipótesis de que sólo dos agentes causaban daños al concreto, el congelamiento y el agua de mar, haciendo a un lado cualquier otro tipo de reacciones que se relacionan con la pasta y los agregados, las cuales por lo general tienen efectos perjudiciales que normalmente dan origen a expansiones nocivas para la integridad del concreto.³

En la actualidad, todavía existen algunas estructuras de concreto reforzado construidas a finales del siglo pasado, lo cual significa que éstas pueden durar más de 100 años; por otro lado, también numerosas estructuras de construcción de la misma época se deterioraron en el curso de pocos años y tuvieron que ser reparadas ó reemplazadas, con lo cual se define que la durabilidad del concreto no es una característica intrínseca e invariable, sino que se debe de procurar para cada caso en particular.⁴

Gracias a la investigación en tecnología del concreto, ahora se consideran diversas condiciones causantes de una baja en la durabilidad del concreto, como su simple exposición al medio ambiente que le produce carbonatación; exposición a ataques químicos por ácidos o sulfatos presentes en los suelos y en el agua con que tienen contacto las estructuras; causas químicas asociadas al cambio volumétrico como la reactividad entre el álcali del cemento y agregados reactivos⁴. Además, se encuentran también las causantes mecánicas del rápido deterioro del concreto, como lo es la abrasión presentada por la fricción por rodamiento⁵, cavitación, etc.⁶ También se ha encontrado fuerte correlación con las condiciones presentes en la etapa de la construcción, tanto en los procedimientos seguidos⁷ como en el efecto de las condiciones atmosféricas³.

En muy pocas ocasiones se encuentra que el deterioro del concreto sea causado por un sólo agente, por lo tanto es difícil (regularmente) determinar un factor que particularmente este afectando a las estructuras.⁸

Un dato sumamente relevante y de gran impacto que representa el efecto de una estructura de concreto afectada en términos de durabilidad y sus correspondientes costos de reparación, es el que aproximadamente el 42% de todos los puentes de E.U. presentan serios problemas estructurales debidos a una baja en la durabilidad del concreto y sus consecuencias posteriores, su costo de reparación es de 90 mil millones de dólares; ahora, considerando una multitud de otras estructuras afectadas (como carreteras, edificios, etc.) el monto es muy similar a un 6% de su deuda interna nacional.⁹

Como una solución a estas cuestiones, se está desarrollando cada vez más un tipo de concreto denominado concreto de alto desempeño ó High Performance Concrete, el cual ha dejado de ser un material de laboratorio, presentando, además, las características esenciales para incrementar la durabilidad.¹⁰

Sin embargo sus costos iniciales de producción generalmente rebasan los del concreto normal, por lo que su uso no se ha difundido tanto como se esperaría.¹⁰

Ante lo cual, es necesario realizar estudios que señalen de manera clara, en formas cuantitativas y cualitativas, el beneficio obtenido cuando se emplea un concreto de alto desempeño, en el aspecto de durabilidad de una estructura de concreto.

Objetivo.

Efectuar un análisis con enfoque tecnológico y económico del concreto de alto desempeño, considerándolo como un material de construcción que incrementa la durabilidad de las estructuras de concreto, desde su producción hasta su evaluación en la etapa de funcionamiento, considerando factores tales como su ciclo de vida y periodos de mantenimiento, en función del medio y de los agentes presentes, en base a insumos de la región del noreste de México.

Antecedentes.

Dentro de la comunidad de investigación en el ámbito internacional, se han desarrollado numerosos materiales y métodos destinados a las reparaciones de estructuras de concreto.¹¹

También se han detectado ampliamente las condiciones que causan el deterioro de las estructuras de concreto; y a la vez se han determinado consecuentemente las características deseables del concreto para que tenga un comportamiento satisfactorio.¹²

Inclusive, se ha estado promoviendo cada vez más la investigación en materia de concreto de alto desempeño; y se ha pedido en países altamente desarrollados, el apoyo de los gobiernos para incrementar, intensificar y diseminar la investigación, desarrollo o uso del concreto de alto desempeño, que por sus características, vendría a dar solución a una gran serie de problemas presentados en las estructuras de concreto, por escasa durabilidad o mantenimiento, en especial obras de infraestructura, que en consecuencia provocan serias pérdidas económicas.^{13, 14}

Sin embargo, hasta ahora, el enfoque económico dado al concreto de alto desempeño se ha limitado a los beneficios que trae consigo su alta resistencia, como lo es el ahorro de miembros estructurales, su disminución de dimensiones, etc.^{15, 16}, dejando sin evaluar el ahorro que se tiene al emplear un concreto más

durable, que no tendrá o requerirá de mantenimiento continuo y/o reparaciones; ni se han hecho consideraciones sobre la inversión en estructuras de concreto y su rentabilidad en su ciclo de vida.

Particularmente, en México, es casi nulo el avance que se tiene en el tema en general en concreto de alto desempeño.

Justificación.

Ya no es permisible el hecho de la presentación de continuas fallas y/o deterioros constantes de las estructuras de concreto, cuando las actividades productivas tienen que ser cada vez más precisas y desarrollarse en ambientes físicos libres de complicaciones.

Las nuevas teorías de desarrollo sostenible cada vez nos impulsan más hacia la eficiencia en el uso de los recursos naturales, la reutilización de productos y al reciclaje, lo cual obliga a emplear de mejor manera y de forma más consciente los materiales de construcción.^{17, 18}

El aspecto social, por su parte, frecuentemente exige más infraestructura, y sobre todo que ésta sea segura y de una excelente calidad; y en la parte habitacional, que la vivienda sea más confortable.

Marco teórico.

Cuando se compara con el concreto de resistencia normal, el concreto de alto desempeño (HPC) no sólo provee una alta resistencia a la compresión, sino también de una durabilidad mucho mayor. Las propiedades del HPC, entonces pueden ser usadas con grandes ventajas para una gran cantidad de aplicaciones que requieren un material de construcción de gran calidad. No obstante, el diseño de la mezcla de concreto, el mezclado, transporte y colocación, es más delicado para el concreto de alto desempeño que para el concreto normal. Consecuentemente, aunque el concreto de alto desempeño puede ser producido fácil y eficientemente en las plantas concreteras con su equipo normal, requiere de personal mejor calificado y un control de calidad más alto.¹⁰

Modelo Particular.

La solución que se pretende dar a la problemática encontrada, es el empleo de concreto de alto desempeño en las estructuras como un agente que incrementa notablemente la durabilidad; y mostrar mediante un análisis tecnológico la factibilidad de su uso, empleo en la obra de construcción y su servicio, y su expresión en términos económicos.

Alcance de la Investigación.

Esta investigación evaluará desde el aspecto económico y tecnológico la producción de concreto de alto desempeño en la región, su empleo en obras de construcción, las características de durabilidad que proporciona a las estructuras, y su incremento y pronosticabilidad de su ciclo de vida, sin hacer consideraciones precisas sobre su comportamiento estructural, fluctuaciones del mercado de la construcción, y asumiendo que los recursos humanos en la construcción están lo suficientemente capacitados; de acuerdo a los requerimientos observados en un caso de estudio seleccionado.

Impacto y Contribución.

Se espera que el trabajo de tesis por realizar, contribuya de manera significativa para que, primeramente se den a conocer en la región las características de durabilidad que el concreto de alto desempeño brinda a las estructuras con los factores presentes en el medio, y su evaluación económica; y, además, sirva como una herramienta de decisión para el diseñador, el productor de concreto, sobre todo para el usuario y el inversionista de las estructuras de concreto.

Metodología.

1. Considerar la problemática actual de estructuras de concreto en función de encontrarse afectadas por su deficiente durabilidad.
2. Analizar el concreto de alto desempeño considerando el empleo de diversos agregados pétreos de la región, a partir de las características que incrementan su durabilidad.

3. Realizar las pruebas que permitan evaluar la durabilidad del concreto por ataque químico, resistencia a la compresión, análisis de la estructura capilar del concreto, así como determinar sus características relevantes y las de sus ingredientes.
4. Calcular la vida del concreto normal y del concreto de alto desempeño mediante el uso de técnicas de predicción del ciclo de vida del concreto, para un ambiente determinado.
5. Determinar el procedimiento de fabricación del concreto de alto desempeño, así como los parámetros que intervienen en su transporte y diseño de mezcla, considerando y evaluando el aspecto económico, por medio de un análisis de costos.
6. Estudiar el impacto del empleo de concreto de alto desempeño en la construcción, desde el punto de vista de análisis de costos de su ciclo de vida, considerando el nuevo procedimiento de construcción resultante y su control de calidad en las etapas de fresco, fraguando y endureciendo.
7. Analizar el incremento en la productividad que se genera en las estructuras de concreto al emplear concreto de alto desempeño, en términos de durabilidad y determinabilidad del ciclo de vida, ahorro por mantenimiento, incremento de la seguridad estructural, mejora de la habitabilidad y eficiencia de su funcionamiento; y, contrastando el análisis con los problemas que han presentado en su entorno, estructuras dañadas por una baja durabilidad del concreto y las consecuentes pérdidas económicas.
8. Hacer consideraciones cualitativas en el valor agregado que se proporciona a las estructuras al emplear concreto de alto desempeño, desde el enfoque de su presencia en el medio.
9. Presentar la medida de la aportación al desarrollo sostenible del concreto de alto desempeño.

Referencias

- ¹ U.A.N.L., Facultad e Instituto de Ingeniería Civil. Memoria del Seminario Internacional sobre Durabilidad del Concreto. 1993. Prefacio. Pag. i-ii.
- ² Cottier Cavides, Juan Luis. *Efecto de la reacción Alkali-agregado en el Concreto*. Memoria del Seminario Internacional de Durabilidad del Concreto. U.A.N.L. 1993. Pag. 16.
- ³ Mena Ferrer, Manuel. *Concreto en Clima Caluroso: aspectos sobre la durabilidad*. Memoria del Seminario Internacional de Durabilidad del Concreto. U.A.N.L. 1993. Pag. 284
- ⁴ Mather, Bryant. *How to obtain Durable Concrete*. Memoria del Seminario Internacional de Durabilidad del Concreto. U.A.N.L. 1993. Pag. 1-13.
- ⁵ Lamond, Joseph F. *Durability of Concrete Pavements*. Memoria del Seminario Internacional de Durabilidad del Concreto. U.A.N.L. 1993. Pag. 319-339.
- ⁶ Palbøl, Lars; et al. *Petrographic examination of mortar coatings: 0-60 year old water pressure pipes*. Concrete International. March 1998.
- ⁷ Schutz, R.J. *Durabilidad del Concreto Superplastificado*. Memorias del Simposio Internacional sobre Tecnología del Concreto: Superplastificantes. U.A.N.L. 1979. Pag. 77-97.
- ⁸ Neville, Adam M. *Durabilidad del Concreto*. Tecnología del Concreto Tomo III. 1988. Pag. 11-127
- ⁹ Secre, Will; et al. *New development in corrosion inhibiting admixture systems for reinforced concrete*. Memoria del Seminario Internacional de Durabilidad del Concreto. U.A.N.L. 1993. Pag. 219-242.
- ¹⁰ Pleau, Richard; et al. *High Performance Concrete: mechanical properties and durability aspects*. Memoria del Seminario Internacional de Durabilidad del Concreto. U.A.N.L. 1993. Pag. 387-405.
- ¹¹ ACI Committee 546, *Concrete Repair Guide*. 1996
- ¹² *Proceedings of the Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*. 1997.
- ¹³ Civil Engineering Research Foundation. *High Performance Construction Material and Systems: An essential program for America and its Infrastructure*. Report 93-5011, 93-5011.E. April 1993.
- ¹⁴ G. Frohnsdorff; S. Shyam Sunder; J. E. Hill. *High Performance Concrete Construction. Advanced Technology Program. Focused Program Recommendation*. May 9, 1995.
- ¹⁵ Moreno, Jaime. *High Performance Concrete: Economic Considerations*. Concrete International. March 1998. Pag. 68-70.
- ¹⁶ Ralls, Mary Lou. *Texas High Performance Concrete Bridges: How much do they cost?.* Concrete International March 1998.
- ¹⁷ Holmberg, John; Karl-Henrik Robert; Karl-Erik Eriksson. *Socio-ecological Principles for Sustainable Development*.
- ¹⁸ The World Bank and Agenda 21. *Advancing Sustainable Development*.