



**Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

**CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO A NIVEL
MICROESTRUCTURAL**

**Fredy Chojolán Duarte
Asesorado por: Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz**

Guatemala, marzo de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO A NIVEL
MICROESTRUCTURAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

Fredy Chojolán Duarte

Asesorado por: Ing. FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ

Al conferírsele el título de

INGENIERO CIVIL

Guatemala, marzo de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Inga. Patricia Villatoro de Escobar
EXAMINADOR	Ing. Fernando Samayoa Roldan
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
SECRETARIA	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO A NIVEL MICROESTRUCTURAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha de 29 de abril de 2003.

FREDY CHOJOLÁN DUARTE

AGRADECIMIENTO ESPECIAL A:

- DIOS
Por darme vida y sabiduría para alcanzar mis metas.
- MIS PADRES
Margarita del Carmen Duarte Martínez y Oscar Domingo Chojolan Racancoj, que sus consejos me enseñaron a ser responsable, su amor y comprensión a valorar lo que tengo y sus esfuerzos a forjar en mi quien ahora soy.
- MI ESPOSA
Quien ha estado a mi lado y esta experiencia nos sirva de ejemplo para seguir adelante.
- MIS HERMANOS
Que les agradezco porque siempre me brindan su apoyo para seguir adelante.
- MIS AMIGOS
Por me enseñaron a que la amistad no es sólo compartir sino ayudarnos a salir adelante.
- A los ingenieros Francisco J. Quiñónez de la Cruz y Julio R. Luna A., por su asesoría en el presente trabajo.
- El Ministerio de Energía y Minas en especial, a el Departamento de Investigaciones Mineras, por su incondicional apoyo.
- Cementos Progreso, en especial a el Ingeniero Emilio Beltranena y al Centro tecnológico, por valiosa colaboración en éste trabajo.
- Mixto Lixto, por su colaboración en este trabajo.
- A LA FACULTAD DE INGENIERÍA
- A LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

ACTO QUE DEDICO A:

MIS PADRES

Margarita del Carmen Duarte Martínez
Oscar Domingo Chojolan Racancoj

MI ESPOSA

Aura Cristina García González

MIS HERMANOS

Oscar David, Arnoldo, Edwin, Brenda, Norma
Sandra y Rony

MIS SOBRINO

Cinthia, Marco David, Jade, Gerardo, Nicolás

MIS CUÑADOS

Con cariño y afecto.

MIS PRIMOS

Con mucho cariño.

MIS TÍOS

Con afecto.

MIS ABUELITOS

Con Amor.

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. MICROESTRUCTURA DEL CONCRETO	
1.1 Definición de la microestructura del concreto	1
1.2 Características de la microestructura del concreto	2
1.3 Las técnicas para el estudio de la microestructura	3
1.4 La microestructura del cemento anhidrido	7
2. FASES Y EFECTOS EN CONCRETOS	
2.1 Las fases sólidas en la pasta de cemento	11
2.2 El desarrollo de la microestructura durante la hidratación de la pasta de cemento	12
2.2.1 (0 a 3) horas	13
2.2.2 (3 a 24) horas	17
2.2.3 24 horas en adelante	22
2.3 El efecto de reemplazos minerales en la microestructura	30
2.4 La caracterización de la microestructura de pasta global	36

3. CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO EN CONCRETO

3.1	Los agregados	42
3.2	La pasta de cemento en la interfaz de los agregados	45
3.3	El efecto de humo de sílice en la interfaz de los agregados	53
3.4	La microestructura global del concreto	54

4. DURABILIDAD DEL CONCRETO

4.1	Procesos químicos de deterioro en el hormigón	59
4.2	Consecuencias en el concreto	61
	4.2.1 Lixiviación	61
4.3	Acción de las disoluciones ligeramente ácidas	62
	4.3.1 Características	63
4.4	Acción de las aguas puras	65
4.5	Características y acción de las aguas puras	66
4.6	Ataque de sulfatos al hormigón	66
4.7	Características de ataque de sulfatos en el concreto	67
	4.7.1 Acción de las sales en disolución acuosa	67
	4.7.2 Recomendaciones y medidas practican	68
	4.7.3 Medidas preventivas para disminuir o evitar la acción corrosiva sobre el hormigón	70

5. APARATOS Y MÉTODOS PARA LA OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA DEL CONCRETO A NIVEL MICRO

5.1	El método de prueba normal para la determinación microscópica de parámetros de aire nulo	73
-----	---	----

5.2	El método normal para el sistema en el concreto endurecido	
	73	
5.2.1	Método por línea transversal	73
5.2.2	El método punto conteo modificado	75
5.3	Aparatos para la medida de especímenes	77
6.	EXPERIMENTACIÓN DE MUESTRAS CON LOS EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS ESTABLECIDOS	
6.1	Análisis y características generales de las muestras de acuerdo a las observaciones	82
6.1.1	Muestra 1	82
	6.1.1.1 Descripción de la muestra en microscopia	84
6.1.2	Muestra 2	87
	6.1.2.1 Descripción de la muestra	88
6.2	Observación microscópica para la obtención de datos para calcular los parámetros de los métodos de línea transversal y punto conteo modificado para la muestra 1 y muestra 2.	91
7.	RESULTADOS	
	Resultados	99
	CONCLUSIONES	101
	RECOMENDACIONES	103
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	105
	BIBLIOGRAFÍA	115
	ANEXO	117

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Microestructura de una escoria comercial	8
2	Cristales en el cemento anhidro	9
3	Sección pulida de granos de cemento anhidro	9
4	Gráfica de la partícula-tamaño para un cemento típico obtenido por la difracción láser	10
5	Pasta de cemento hidratado por 10 minutos	15
6	superficie fracturada de una pasta de cemento hidratada por una hora	16
7	Sección delgada, pasta de cemento hidratado por dos horas	16
8	Superficie fracturada de una pasta de cemento	17
9	Célula ambiental de una pasta de cemento con un día de hidratación	19
10	Reacciones secundarias de la fase de aluminio en una pasta de cemento	19
11	Sección delgada de una pasta de cemento con media hora de hidratación	20
12	Parte de un grano de cemento anhidro	20
13	Cemento anhidro, reacción entre partículas	21
14	Sección pulida de un cemento de 12 horas de hidratación	21

15	Grano parcialmente hidratado en una pasta de cemento de 69 días	23
16	Reliquia de un grano altamente reactivo de una pasta de 23 años	24
17	Superficie fracturada de una pasta de cemento de 14 días	24
18	Superficie fracturada de cemento blanco con un día de edad	25
19	Cristal de belle revelado en la fractura de la superficie de una pasta de cemento con 14 días de edad	27
20	Cristal de belite en una exhibición de 3 meses	27
21	Reliquia de cristal de belite de 23 años, ha reaccionado totalmente la pasta de cemento	28
22	Reliquia de granos alargados de un año de antigüedad de la pasta de cemento	28
23	Resumen del desarrollo microestructural para un grano de cemento	29
24	Microestructura de pasta de cemento de 23 años	30
25	Granos de cemento depositados en la superficie de una partícula de ceniza volante	32
26	Partículas volantes sobre superficie fracturada de una partícula de cemento	32
27	Partículas de ceniza son visibles en una región de hidróxido de calcio de una pasta de cemento	33
28	Pasta de cemento, crece masa de hidróxido de calcio alrededor de granos de escoria angular	33
29	Granos de cemento y escorias parcialmente hidratados	34
30	Sección pulida de una pasta de cemento/humo de sílice	35

31	Superficie fracturada de una pasta de cemento a razón de 0.5 % de hidratación	37
32	Superficie fracturada de una pasta de cemento a razón de 0.3% de hidratación	38
33	Constituyentes microestructurales en una pasta de cemento	39
34	Fotografías de (a) grava y (b) granito machacado	44
35	Micrográficas de partículas de arena	44
36	Capa de cemento depositado sobre la superficie de un agregado	46
37	Microestructura del borde de un grano	46
38	Zona de contacto entre calcita y pasta de cemento	47
39	Capa delgada del producto hidratante sobre el agregado	47
40	Poca cantidad de granos grandes de cemento cerca del agregado	49
41	Región interfacial de 10 semanas del espécimen compuesto	50
42	Medida de pendientes microestructurales en la región interfacial	51
43	La pendiente microestructural de la región interfacial compuesta 10 semanas antes	52
44	Pendiente microestructural región interfacial promedio 50 campos (a) material anhidro, (b) porosidad, (c) error normal	53
45	Región interfacial de humo de sílice en el hormigón	55
46	Microestructura del hormigón	56
47	Microscopio <i>point-count</i> , dispositivo que reúne los	

	requisitos para cualquiera de los dos métodos a utilizar	77
48	Microscopio <i>linear-traverse</i> , dispositivo que reúne los para cualquiera de los dos métodos a utilizar	79
49	(a) Fotografía sección pulida, (b) Esquema visto en microscopio de la muestra 1	97
50	(a) Fotografía de la sección pulida, (b) Esquema visto en microscopio	98
51	Características de las observaciones al microscopio	99
52	Datos de los parámetros de vacíos (poros)	100

TABLAS

I	Reacciones, compuestos formados, fenómenos y alteraciones en el hormigón	60
II	Reacción de los ácidos que forman sales de calcio de Características solubles e insolubles	63
III	Examen visual del concreto	118
IV	Examen para el concreto en secciones delgadas	120

GLOSARIO

Anhidro	Material impermeable.
Caliza	Roca sedimentaria compuesta en gran parte por el mineral calcita, formada ya sea por procesos orgánicos o procesos inorgánicos.
El termino AFt	Denota las fases relativas a calcio, aluminio y trisulfato ($\text{Ca}_3\text{Al} - 3\text{CaSi} - 32\text{H}_2\text{O}$) con el Fe indicando la posible sustitución del aluminio por el hierro en la estructura. Esta fase se forma cuando la concentración de iones de sulfato en la solución es relativamente alta y tiene una morfología de varillas hexagonales.
La fase AFm	Esta estructurada con monosulfato aluminio y calcio ($\text{Ca}_3\text{Al} - \text{CaSi} - 12\text{H}_2\text{O}$). En adición a posibles sustituciones del aluminio por iones de hierro, hidróxido, carbono, o clorhídrico podrían remplazar el sulfato. Estas fases tienen una lámina morfológica hexagonal.
Interfaz	Es el limite entre le agregado y la pasta de cemento.
Petrografía	Esta parte de la geología pone énfasis en la descripción de las rocas desde el punto de vista de la textura, la mineralogía y la composición química.
Reacción álcali – carbonato	Algunas rocas carbonatadas reaccionan con los álcalis produciéndose expansiones y agrietamientos perjudiciales, las reacciones que afectan al concreto, generalmente, se asocian con calizas dolomíticas arcillosas. El concreto afectado por la reacción expansiva álcali – carbonato, se caracterizan por un patrón de agrietamiento, generalmente, mas

desarrollado en las partes de la estructura en las que el concreto tiene una constante renovación de humedad.

Reacción

álcali – sílice

Al reaccionar los álcalis (Na_2O) y K_2O) procedentes del cemento o de otras fuentes, con el hidróxido de potasio, sodio, calcio, y los componentes silíceos de los agregados, se provoca un decremento de volumen y contracción del concreto por desecación.

Sección – delgada

Lamina de roca delgada, es decir adelgazada hasta hacerla translúcida.

Vacíos (vesículas)

Aberturas generalmente elípticas o cilíndricas , formadas en el concreto por la expansión del gas que escapa de la solución.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación, comprende datos específicos sobre la microestructura del concreto donde se observarán los resultados más positivos del análisis cualitativo y cuantitativo de la caracterización del concreto y se sugerirán las medidas que se necesitan para obtener concretos de alta calidad.

Los análisis se realizan observando al microscopio petrográfico los especímenes de concreto.

Para ello, se tomarán en cuenta las reacciones que se producen entre el agregado y la pasta de cemento, esto se determinará por medio del análisis visual según la norma ASTM C-856 (Examen petrográfico para el concreto endurecido).

Por medio del análisis visual, se logra comprender el proceso que lleva a cabo el concreto durante su hidratación a ciertas edad. Además de poder predecir una petrografía completa del concreto por medio del microscopio petrográfico.

Se analizarán los efectos en el concreto de acuerdo al contenido de poros por medio de la norma ASTM C-457-98 (Método normal para la determinación microscópica de los parámetros de vacíos en concretos endurecidos),

Los análisis cualitativos deben realizarse periódicamente para lograr determinar las reacciones y las características que se presentan en el concreto.

Del análisis de las muestras utilizadas según el agregado sea volcánico o calizo se logra determinar que el agregado calizo permite una mejor hidratación y un concreto de mejor calidad, además de una disminución en el contenido de vacíos.

Se producen las reacciones álcali-sílice y álcali-carbonato en el concreto y que no son observables al microscopio por la edad del concreto examinado, pero que, debido a las condiciones de servicio a las que está sujeto el concreto, en un futuro se logrará su observación.

OBJETIVOS

General

Aportar un documento que sea de utilidad para las personas que trabajen con hormigones a nivel microestructural. Que el Centro de Investigaciones de Ingeniería de Concreto, posea un documento, donde se tenga la capacidad de obtener información de cual es el comportamiento que tiene el concreto a nivel interno, microestructural.

Específicos

- 1 Dar a conocer el tipo de equipo utilizado para analizar la microestructura del concreto, así como por medio de estos aparatos analizar el tipo de falla que se produce en el concreto a nivel interno y del comportamiento que adquieren los materiales cuando son mezclados entre si, para ello se analizaran los vacíos, así como las textura de los materiales por medio de la microestructura.
- 2 Procedimiento y normas en el análisis y determinación microscópica de aire nulo (vacíos).
- 3 Experimentar con las normas y equipos en concretos de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

La caracterización del concreto a nivel microestructural se puede hacer por medio de un análisis petrográfico, aplicado al concreto endurecido (APCE), esto nos proporciona información básica del material tal como: características físicas y químicas del agregado, características de la pasta y la relación (o interacción) que existe entre la pasta y el agregado.

En forma particular, el examen petrográfico permite la realización de una evaluación del estado de calidad del concreto bajo análisis. Este método de ensayo debe considerarse como herramienta fundamental en el control y verificación de calidad.

Estos análisis van dirigidos a lugares donde se manejan grandes volúmenes de concreto, principalmente, construcciones grandes o fábricas de concreto premezclado, para tener lineamientos y consideraciones en base a lo especificado por la norma ASTM C – 457 – 98 (Método normal para la determinación microscópica de los parámetros de vacíos en concretos endurecidos).

Para el análisis del concreto a nivel microestructural, se dejará indicado de los efectos que el mismo tendrá en un futuro y planear otros procedimientos para la elaboración de concretos de mejor calidad.

Las muestras a las que se les aplica el APCE pueden ser tomadas de construcciones de concreto en servicio, porciones cortadas de estas y especímenes de mortero o concreto; dichas muestras pueden estar expuestas a condiciones ambientales, condiciones de servicio simulado o sujetas a ensayos en laboratorio.

La calidad de los concretos depende de los tipos de agregados a usarse para su elaboración. La “frase construcción de concretos” incluye toda clase de objetos, unidades, estructuras de concreto, o de cemento hidráulico.

Este tema es aplicado cotidianamente en países altamente desarrollados (E. U. A, Inglaterra, Canadá, etc.), pero en países en vías de desarrollo como el nuestro, este análisis no ha pasado de ser considerado como una curiosidad técnica.

Se realizarán dos tipos de muestras de concreto, con diferente tipo de agregado grueso de los cuales se sacarán secciones pulidas para cada muestra, para luego ser analizadas al microscopio.

Se dejará constancia de las observaciones realizadas al microscopio petrográfico, para determinar las características microestructurales que tienen las muestras de concreto, de acuerdo al comportamiento de los agregados.

De las muestras obtenidas, se dejará constancia del procedimiento empleado para la elaboración de las secciones pulidas, de las observaciones microscópicas realizadas y del análisis empleado para la determinación de las características microestructurales de cada muestra.

1 MICROESTRUCTURA DEL CONCRETO

1.1 Definición de la microestructura del concreto

Los aspectos que contribuyen con la microestructura del concreto son considerados e ilustrados desde la microestructura del cemento anhidro hasta la microestructura del concreto endurecido. En cada etapa la importancia de la caracterización cuantitativa y métodos de alcanzar la misma son discutidos.

El nivel de comportamiento de todo material se relaciona con su microestructura. El entendimiento de estas relaciones entre estructura y propiedades forma la base de la ciencia de los materiales. La microestructura comprende un amplio rango de niveles estructurales, desde la escala atómica hasta la escala de los componentes de ingeniería, e incluye todas las discontinuidades adentro de y entre las fases, como dislocaciones, límites del grano, fases de interfaz, poros y fisuras¹. La caracterización completa de la microestructura de un material con fases múltiples debe también implicar información cuantitativa acerca de las proporciones relativas de las diferentes fases y su distribución en el espacio. La relativa escasez de éxito en el desarrollo de las relaciones microestructura / propiedad del concreto se debe, en gran parte, a la falta de una buena caracterización microestructural.

En términos microestructurales, el concreto es un sistema extremadamente complejo de fases sólidas, poros y agua, con un alto grado de heterogeneidad.

Esta heterogeneidad puede ser considerada en varios niveles. En el nivel más simple, el concreto consiste en partículas agregadas, distribuidas dentro de una matriz de pasta de cemento. A un nivel más detallado, la misma pasta es una mezcla de cemento virgen, productos hidratantes, poros, agua; y a un nivel aun más fino estas fases también tienen sus propias microestructuras complejas.

1.2 Características de la microestructura del concreto

Se considerarán varios aspectos de la microestructura del concreto en un intento por proporcionar una imagen coherente. Como introducción se da una breve descripción de la química y la estructura de las fases sólidas de pastas de cemento, seguida por un corto sondeo de los métodos físicos utilizados para estudiar la microestructura. Inicialmente, los componentes de la microestructura del concreto son considerados por separado: la microestructura del cemento anhidro; el desarrollo de la microestructura durante la hidratación de la pasta de cemento; la microestructura de los productos de hidratación en el estado no seco y la manera en que su morfología cambia al secar. Sin embargo, debido al método de la preparación del espécimen, solo pueden ser observadas las superficies exteriores de los granos hidratantes.

Secciones cortadas por un rayo iónico permiten ver la estructura en una sección de cruz, a través de un microscopio de transmisión electrónica^{6,15-20}. La fragilidad de las pastas de cemento y concreto hace que la preparación de las secciones transparentes de electrones sea muy difícil, y las pastas jóvenes deben ser impregnadas previamente con resina epóxica.

El uso de microscopio electrónico de transmisión de sondeo (STEM) minimiza el daño ocasionado al cemento por el rayo de electrones. Por medio de un corte cuidadoso pueden ser obtenidas áreas transparentes de electrones con una extensión considerable; sin embargo, una cierta cantidad de selectividad es inevitable.

Otra técnica utiliza imágenes de electrones esparcidos de secciones pulidas. En secciones gruesas pulidas se pueden ver amplias áreas seccionadas transversalmente con el microscopio electrónico de transmisión de sondeo (STEM). Sin embargo, no muestran un buen contraste secundario de electrones. Usando un par de detectores de electrones esparcidos se pueden reproducir imágenes en las que la intensidad depende del promedio del número atómico del área examinada. De este modo en las secciones pulidas pueden ser diferenciados entre ellos, el material anhidro, el hidróxido de calcio masivo, otros productos hidratantes, porosidades y partículas agregadas. El contraste entre estos constituyentes es suficiente para permitir un análisis cuantitativo de imagen del área total, y la distribución por tamaños²². La forma y distribución de los productos hidratantes observable es comparable con los que son vistos a través del microscopio electrónico de transmisión de sondeo (STEM) en folios delgados, a pesar de tener una menor resolución.

1.3 Técnicas para el estudio de la microestructura

Las técnicas que han sido utilizadas para estudiar microestructuras; se pueden dividir en dos categorías. Técnicas indirectas o ambiguas ofrecen información proporcional a toda la microestructura.

Ejemplos de las técnicas indirectas es la termo gravimetría (TG) y la difracción de los rayos X (XRD), que pueden ser usadas para determinar ciertas cantidades de fases en una muestra. Métodos utilizados para obtener información del tamaño de un poro de distribución, como la porosimetría en la intrusión del mercurio (MIP) y la absorción del metanol, son también, técnicas indirectas que solo dan información de cómo están los poros distribuidos en el espacio. El otro grupo de técnicas es directo o microscópico que provee información acerca de los componentes de las fases alineadas en las estructuras.

La ventaja de las técnicas indirectas es que proveen información de una forma cuantitativa para que diferentes muestras sean comparadas objetivamente. En contraste, la información que deriva de las técnicas directas usualmente toman la forma de las imágenes que son extremadamente valiosas cuando de una impresión muy vivida de microestructuras se trata, pero las comparaciones son subjetivas y se confía en la experiencia e interpretación del observador. Como todos los descubrimientos presentados aquí han sido encontrados por medio de técnicas microscópicas, su aplicación en el estudio de microestructuras del cemento y el concreto serán discutidas de forma detallada.

El microscopio óptico ha sido ampliamente utilizado en el estudio del cemento y el concreto⁷. En pastas hidratadas y concreto hay un pequeño contraste entre las fases en la luz reflejada. Sin embargo, en secciones delgadas las propiedades refractarias de diferentes fases y el uso de resina fluorescente puede indicar cemento, tipo agregado, la presencia de minerales mixtos, con la proporción agua cemento (a/c), la cualidad de compactación, y la presencia de la reacción de silicio álcali^{10,11}.

Últimamente, la resolución del microscopio óptico es limitada por el largo de la onda de luz y por el detallado estudio microestructural que se debe usar con el electrón. Como el cemento no es conductor y como la preparación de la pasta de cemento y el concreto es hecho con la presencia del agua presenta problemas microscópicamente. El posible efecto de secado en la microestructura y la selección de diferentes técnicas de preparación deben ser consideradas a la hora de leer una micrográfica de electrones de la pasta de cemento.

La fractura de superficies es una muestra para observar la disposición de las tres dimensionales de la hidratación del producto. Estas superficies pueden ser figuradas por electrones secundarios en el escanéo microscópico de electrones con una supuesta buena resolución (≈ 10 nm). Mientras proveyendo mas información utilizable, la microestructura se observa usando esta técnica es que la pasta de cemento que ha sido secada y expuesta a alto vacío del electrón. Dada la naturaleza amorfa de los productos hidratados, es obvio que se verá cierta alteración en su morfología que ocurrirá durante la preparación del espécimen. También, solo la trayectoria de fractura será revelada, para que las áreas más débiles de la microestructura predominen. En pastas jóvenes la trayectoria de fractura es Interparticular, enseñando solo la superficie externa de los productos hidratados. En pastas mas viejas la fractura en la superficie es denominada por áreas donde el hidróxido de calcio raja, que ha crecido en el espacio donde se ha concentrado el agua.

La distribución de las fases dentro de los granos de cemento pueden ser estudiados en secciones pulidas preparadas de muestras de cemento disperso en resina de epóxico.

La reexaminación de dichas secciones con el esparcimiento de electrones por microscopio electrónico de sondeo (SEM) (figura 3), indica que la fractura por cristales domina el proceso de moler, con una pequeña evidencia de fracturas durante los límites de la interfase. Casi todos los granos mayores de 2 a 3 micrómetros son poliminerálicos y en la superficie de los granos más grandes solo pequeñas áreas de material están expuestas. Relativamente grandes proporciones de fases de aluminio y de hierro están expuestas en las superficies de granos pequeños, como si la formación es mas parecida a envolver la fractura por medio de este material.

Ahora, muchos cementos se caracterizan solamente por el área de la superficie y la composición de oxido. El área de la superficie es generalmente determinada por métodos de permeabilidad. Muchos métodos dan un valor mas bajo al área de la superficie que el método de absorción, porque los canales bloqueados no son accesibles para el movimiento el de la corriente de aire. Las medidas del área de la superficie provee de poca información sobre la distribución del tamaño de las partículas, que es de gran importancia cuando se determina el empaqueo de los granos del cemento en pasta y concreto. El método de difracción por medio de láser pueden ser usados para medir la distribución de tamaños. El resultado de un cemento típico esta en la figura 4.

En la ilustración de la figura 3, la distribución de las fases en los granos de cemento puede ser vistas en imágenes del microscopio electrónico de barrido(bse), de secciones pulidas. Si estas imágenes son analizadas en conjunto con mapas de puntos de energía dispersa en análisis de rayos X de las mismas áreas, las cantidades relativas de silicato y las fases de corte pueden ser medidas.

Esta técnica puede ser extendida a medida que las proporciones relativas de las fases expuestas en las superficies de los granos, de las cuales se puede esperar determinen la reacción inicial del cemento. Estudios preliminares han demostrado que estas proporciones de las superficies pueden diferir significativamente en los valores del volumen ²⁸.

La caracterización propia de un cemento anhidrido es el primer paso importante en el entendimiento de diferenciaciones que se hacen en la reacción de cementos y las propiedades de los concretos.

1.4 La microestructura del cemento anhidro

Una parte del desarrollo microestructural del concreto debe empezar considerando la microestructura de los materiales iniciales. La microestructura del mas importante de estos, el cemento anhidro, es determinada por la microestructura del grano producido en un horno de cemento, y por el modo en que el grano se quiebra durante la pulverización. El producto resultante es un tanto diferente, tanto en apariencia como en reactividad, que una mezcla simple de granos monominerálicos de los 4 principales minerales anhidros (calcio, aluminio, hierro, sílice).

Una microestructura ideal del grano se constituye de cristales de alito y belito (que son sólidos a la temperatura de fuego) en una matriz de fases intersticiales que se solidifican durante el enfriamiento. Los cristales de alito tienen una forma hexagonal, mientras que los del belito tienden a ser redondos.

En el material intersticial, las fases aluminita y ferrita pueden ser finamente divididas. Los detalles de la microestructura, tales como la forma y la distribución de las fases, depende de las características físicas y químicas de la mezcla cruda (fineza, homogeneidad, composición química) y de las condiciones exactas durante el horneado y enfriamiento del grano. Sin embargo, las características generales descritas anteriormente, pueden ser identificadas en la mayoría de los granos comerciales. Como los que se muestran en la figura 1. Este grano también muestra una fisura extensa, que comúnmente ocurre debida a la tensión térmica durante el enfriamiento.

Figura 1. Microestructura de una escoria comercial



El grano es de tierra y yeso para darle al polvo un amplio rango entre 1 y 100 micrómetros. Las imágenes secundarias de electrón del polvo de cemento en el microscopio electrónico de sonda (SEM), figura 2, da la impresión de la distribución por tamaños y muestra la aglomeración de granos mas pequeños sobre la superficie de los granos mayores. Estas imágenes también nos muestran partículas de yeso esparcidas sobre la superficie de los granos.

Figura 2. Cristales en el cemento anhidro

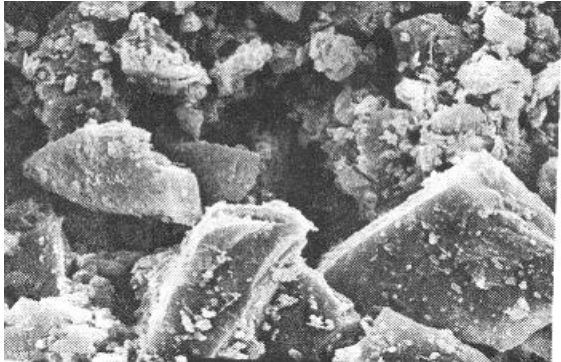


Figura 3. Sección pulida de granos de cemento anhidro

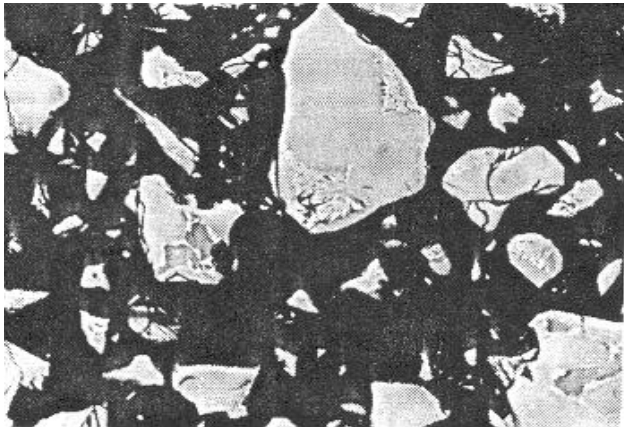
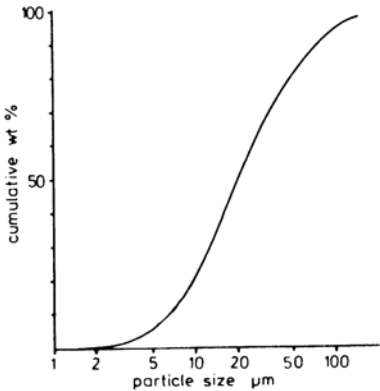


Figura 4. Grafica de la partícula-tamaño para un cemento típico obtenido por la difracción del láser



2. FASES Y EFECTOS EN CONCRETOS

2.1 Las fases sólidas en el cemento

El cemento anhidrido en polvo es la combinación de óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro (sumando pequeñas cantidades de otros óxidos). Los cuatro principales minerales encontrados en el cemento ordinario son similares, silicato de tricalcio (Ca_3Si); silicato de dicalcio impuro (Ca_2Si); y las fases del aluminio y el hierro que tienen composiciones proporcionales de Ca_3Al y Ca_4AFe , respectivamente. Estos minerales reaccionan con agua para dar una variedad de hidratos. El silicato de calcio reacciona para dar hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado y las fases del aluminio y el hierro reaccionan con el sulfato de calcio para dar dos grupos de productos referidos como AFt y AFm.

El hidróxido de calcio (CaH) es el único compuesto de hidrógeno que tiene una estructura cristalina y estequiométricamente bien definida y forma normal en estado sólido, relativamente son cristales con forma hexagonal habitual.

El silicato de calcio hidratado en la pasta de cemento es una gel que presenta no cristalinidad. Su composición es incierta (y posiblemente variable) con una proporción de 1.7 a 2.0; en consecuencia es usualmente descrito como Ca-Si-H.

El corto orden de alineamiento de su fase es probablemente relacionada con la estructura cristalina del silicato de calcio hidratado – 1.4 NM $(Ca_5Si_6H_9)$ Y $(Ca_9Si_6H_{11})^{2,3}$. Estas fases aparecen para adoptar un amplio rango de morfologías⁴⁻⁶, algunas basadas en delgadas hojas que pueden ser estructuras fibrosas o de panal a temprana edad, otros con mas estructuras compactas que se forman en edades tardías.

El termino AFt denota las fases relativas a calcio, aluminio y trisulfato $(Ca_3Al - 3CaSi - 32H_2O)$ con el Fe indicando la posible sustitución del aluminio por el hierro en la estructura. Esta fase se forma cuando la concentración de iones de sulfato en la solución es relativamente alta y tiene una morfología de varillas hexagonales.

La fase AFm esta estructurada con monosulfato aluminio y calcio $(Ca_3Al - CaSi - 12H_2O)$. En adición a posibles sustituciones del aluminio por iones de hierro, hidróxido, carbono, o clorhídrico podrían remplazar el sulfato. Estas fases tienen una lámina morfológica hexagonal.

2.2 El desarrollo de la microestructura durante la hidratación de la pasta de cemento

Durante la hidratación, la pasta de cemento cambia de una combinación de fluidos de cemento en polvo y agua a un sólido rígido. Las reacciones que ocurren son exotérmicas y el progreso de la reacción puede ser estudiado por conducción isotérmica calorimétrica.

De una curva típica de porcentajes de evolución en el cemento ordinario, varias etapas de hidratación pueden ser identificadas, que serán utilizadas como base para describir el desarrollo microestructural (el tiempo indicado solo esta mencionado como una guía general y será afectada por una variedad de factores incluyendo temperatura y otras mezclas añadidas):

1. (mas o menos de 0 a 3 horas). Mezclando, una gran cantidad de calor se ve envuelto; el rango de evolución de calor decrece rápidamente a un minuto después de tres horas. Este período inicial, donde el cemento permanece en fluido y manejable, es referido como el período de inducción.
2. (mas o menos de 3 a 24 horas). Durante este período el 30% de hidratación ocurre, que se ve reflejado en el pico mayor del rango de evolución de calor.
3. (24 horas en adelante). Después de 24 horas el rango de evolución de calor disminuye, aunque la hidratación continúe indefinidamente.

2.2.1 (0 a 3 horas)

Esta fase es particularmente difícil de examinar la microestructura de la pasta de cemento. La mayoría de la mezcla de agua es presentada como libre de agua. Si esta agua es removida para que los especímenes sean examinados en microscopio electrónico, los cambios fundamentales en la microestructura ocurrirán.

Incluso aparte de cualquier daño causado por secado, el tiempo tomado para la preparación de especímenes hacen dificultoso seguir el progreso de la hidratación correcta. Estos problemas hacen a la reexaminación de especímenes sin secado, en la célula ambiental del microscopio electrónico de alto voltaje (HVEM), una especial y valuable técnica para estudiar la hidratación temprana. Usando esta técnica, los especímenes pueden ser examinados en menos de 10 minutos después de hacer la mezcla.

Muchos trabajadores han reportado la aparición de pantallas gelatinosas en la superficie del cemento después de ser mezclado^{6,13,14,29}. Micrográficas de cemento húmedo todas de células ambientales (figura 5), demuestran una pantalla indistinta al producto en la superficie. Productos similares han sido observados durante la hidratación de silicato de trialuminio (C_3A) con yeso.

En la hidratación de silicato de calcio (C_3S), la temprana formación de producto puede ser notable, pero en este caso el producto aparenta tener una película amorfa exfoliadora. Considerando la naturaleza poliminerálica de los granos de cemento, la pantalla gelatinosa observada en la hidratación del cemento es probablemente un producto coloidal amorfo, rico en aluminio y silicio, pero también conteniendo una significativa cantidad de calcio y sulfato, la exacta composición varía dependiendo de la superficie de los granos. Fuera de esta gelatinosa pantalla, pequeñas varas de AFt pueden ser vistos después de un poco de 10 minutos de hidratación (figura 5) y después de una hora estas varas pueden ser vistas claramente en las fracturas secas de la superficie (figura 6)^{6,15,30,32,33}. En la célula ambiental se pueden observar dispersas en la película de carbón a una cierta distancia de la superficie de los granos hidratados³⁰, indicando que han formado un mecanismo de solución-resolución.

Cuando la pasta de cemento está seca, la pantalla gelatinosa colapsa y se encoge hacia atrás de la superficie de los granos. Es dificultoso identificar este producto en superficies fraccionadas, incluso indicaciones de algunos productos gelatinosos pueden ser vistos en rayos de iones en secciones delgadas (figura 7)^{6,30}. Las varas del AFt también se caen hacia atrás dentro de la superficie de los granos, aunque la densidad de las varas todavía este relacionada con la composición de los granos en línea. Después de tres horas de hidratación, la cantidad de formaciones de C-S-H es suficiente para que esta fase sea identificada en la superficie fracturada como pequeñas espigas de la superficie de los granos (figura 8)^{6,33,34}.

Figura 5. Pasta de cemento hidratado por 10 minutos⁷¹

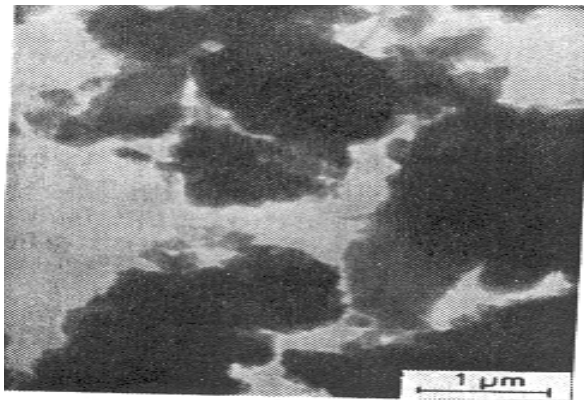


Figura 6. Superficie fracturada de una pasta de cemento hidratado por una hora

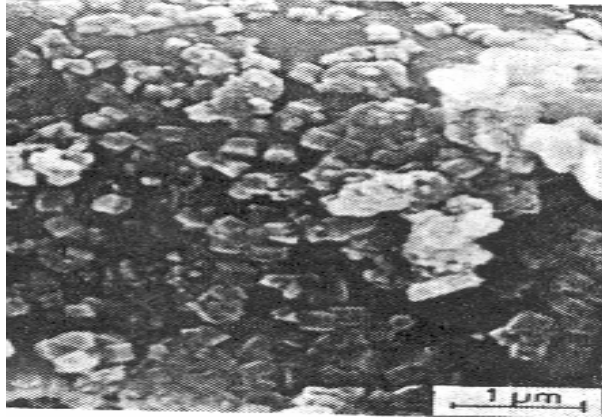


Figura 7. Sección delgada, pasta de cemento hidratado por dos horas

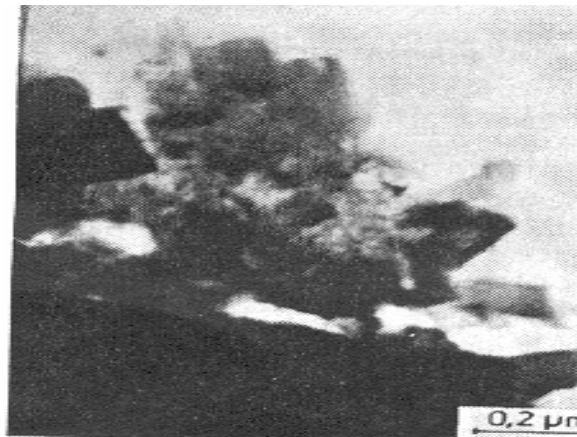
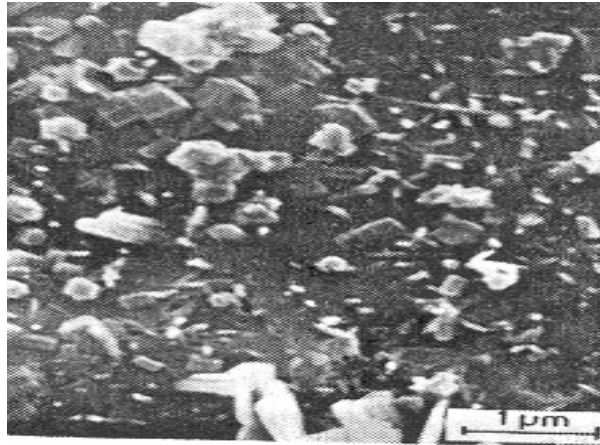


Figura 8. Superficie fracturada de una pasta de cemento



2.2.2 (3 a 24 horas)

El final del periodo de inducción se encuentra marcado por el rápido crecimiento de ambos C-S-H y CH. En el estado húmedo, el C-S-H tiene una película, como la morfología de una hojuela (figura 9), la cual se seca con una morfología fibrosa (tipo de diamante I) donde hay mucho espacio, y a la morfología de un panal (tipo de diamante II) donde el espacio es muy restringido. (la presencia de iones extraños como el Cl⁻ puede también afectar la morfología del C-S-H). Pequeños granos de cemento (los cuales probablemente contienen solo parecidos) se hidratan rápidamente para dar rosetones o esferas de C-S-H figura 10.

En las secciones delgadas de rayos iónicos (figura 11) se puede ver que el cascarón del C-S-H está separado del grano vivo.

Esta separación se puede observar después de 5 horas de hidratación^{6,15} y se cree que ocurre porque el núcleo exterior del C-S-H junta la pantalla gelatinosa que se ha formado con anterioridad en un trabajo de marcos de las varas de Aft. El espacio que es observado en secciones secas esta llena de un alto concentrado o posiblemente solución coloidal en estado mojado, aunque esta discontinuidad entre la cáscara hidratada y el centro. también pueden ser vistas en muestras que no están secas examinándolas en la célula ambiental (figura 12)⁶. El crecimiento de C-S-H entre los granos de cemento vinculan la pasta para que se junte, causando que la pasta se asiente después de 3 a 4 horas de hidratación.

Después de 12 a 18 horas, estos vínculos son tan fuertes como para fracturar las cáscaras hidratadas, como para que cada separación entre ellas y el centro anhídrido pueda ser visto en las fracturas de la superficie (figura 13). cáscaras tan separadas que son completamente vacías en algunos casos, fueron vistas por primera vez por Hadley³⁴ en separaciones fracturadas y tal fenómeno es referido como los “granos Hadley”. Durante la fractura, largos centros anhídridos pueden caerse dejando cáscaras vacías. Sin embargo, en secciones pulidas, mientras puedan verse que todos los granos tienen secciones de separadas y cáscaras hidratantes, la separación entre cáscara y centro es rara vez mayor a 1 micrómetros (∞ m).

La separación entre el grano reactivo y el producto C-S-H indica que la ultima formación ocurre en un mecanismo de solución-resolución. En esta etapa la cáscara está muy abierta y los poros e iones migran a través de ella, dejando que el crecimiento del C-S-H en las superficie externa de la cáscara e incrementando la separación entre cáscara y centro.

Figura 9. Célula ambiental de un a pasta de cemento con un día de hidratación

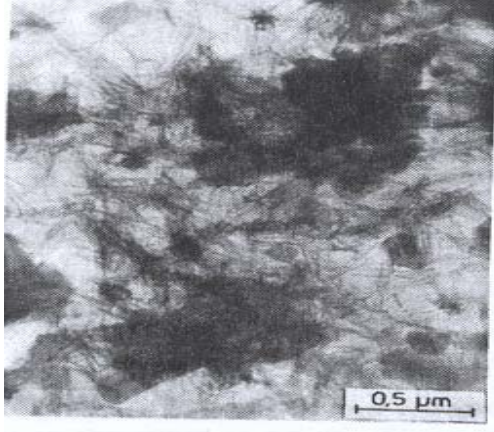


Figura 10. Reacción secundaria de la fase de aluminio en una pasta de cemento

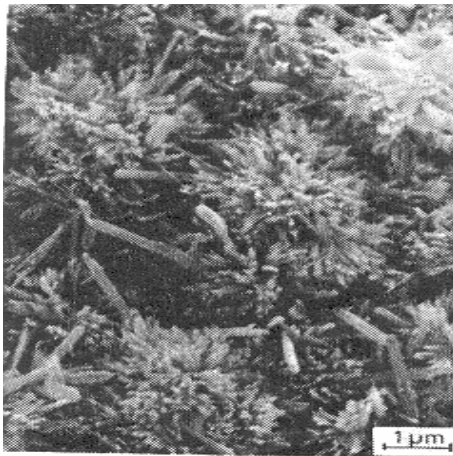


Figura 11. Sección delgada de una pasta de cemento con media hora de hidratación



Figura 12. Parte de un grano del cemento anhidro

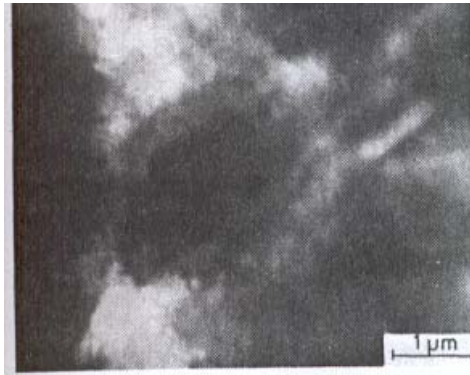


Figura 13. Cemento anhidro, reacción entre partículas

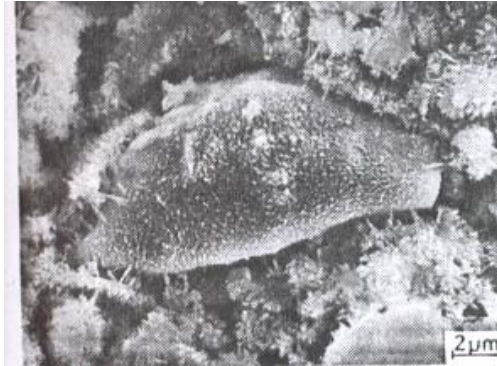
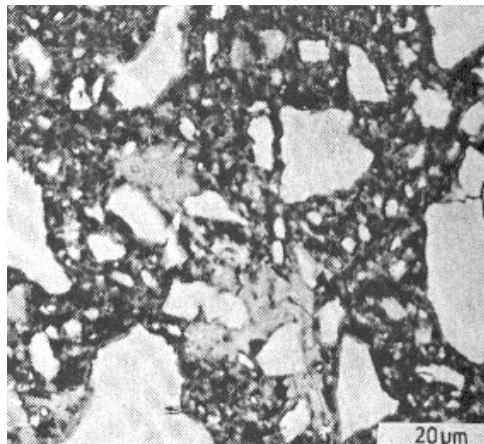


Figura 14. Sección pulida de un concreto de 12 horas de hidratación



El hidróxido de calcio que es un producto de reacción de las fases del silicato es depositado en masa como cristales hexagonales en el espacio que originalmente ocupa el agua. En imágenes del microscopio electrónico de barrido esta fase puede verse en extensas áreas de luz-gris (figura 14).

Después de 16 horas, un nuevo crecimiento de Aft ocurre con largas varas creciendo a través de las pantallas de C-S-H (figura 10). Estos cambios micro estructurados corresponden al hombro del pico de evolución de calor que en algunas ocasiones se observa en curvas caloríficas^{6,27,35}. Los cambios químicos responsables por las reacciones secundarias de la fase del aluminio es probablemente relacionado a la reacción similar, esta reacción de la fase del aluminio puede formarse a separaciones de calor entre el centro y su cáscara hidratada.

2.2.3 24 horas en adelante

Como una cáscara hidratada se adelgaza, se convierte menos permeable y continúa reaccionando con depósitos de C-S-H por dentro de la cáscara. Como el volumen de C-S-H formado es mayor que el producto con el que reacciona, este proceso decrece la separación entre cáscara y centro. Si los granos son suficientemente grandes, esta separación desaparece después de unos siete días de hidratación, para cuando la cáscara es mas o menos de 8 μ m de delgado. (figura 15) Como la hidratación se realiza muy despacio, el cambio podrá ser observable solamente en escala de años. Hay evidencia para creer que este período de hidratación ocurre por un mecanismo topoquímico³⁶. En pastas viejas, tres regiones de producto C-S-H puede ser identificado en las reliquias de los granos hidratados. (figura 16)³⁷. La mayor parte exterior de esta delgada pantalla ($\approx 1 \mu$ m) de C-S-H que esta formada por medio de solución, en el espacio original lleno de agua, durante el mayor movimiento del pico de la curva de calor.

Dentro de esta pantalla, unos 8 μ m de ancho, que esta formada por medio de una solución mediante la cáscara hidratada es separada del centro

anhídrido. Esto es casi todo el producto interno, ocupando el espacio que originalmente llenaba el grano anhídrido. La región interior es también el producto interior, esta fase esta formado por topo químicos o por un mecanismo de solidez.

Figura 15. Grano parcialmente hidratado en una pasta de cemento de 69 días, (Cortesía de K. D. Baldie)

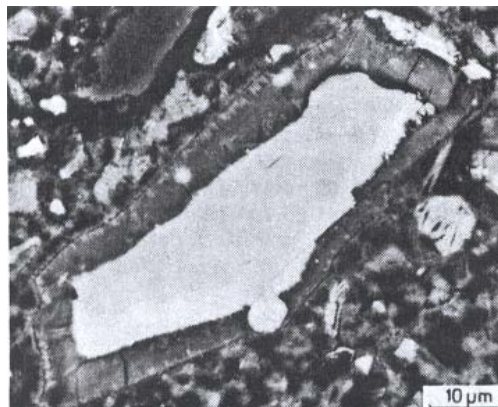


Figura 16. Reliquia de un grano altamente reactivo de una pasta de 23 años

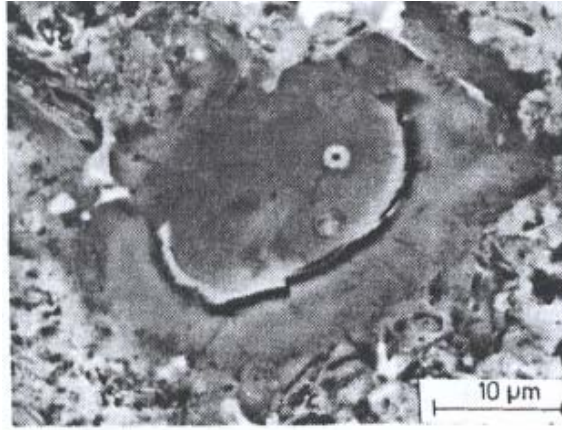


Figura 17. Superficie fractura de una pasta de cemento de 14 días de edad, (Cortesía de A. Ghose)

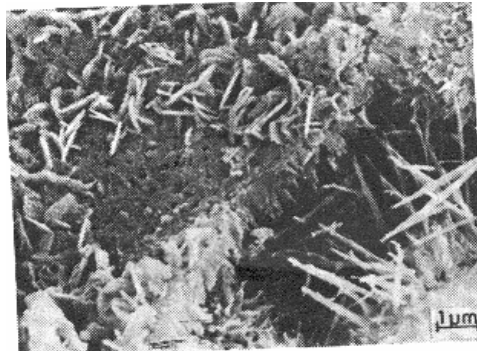
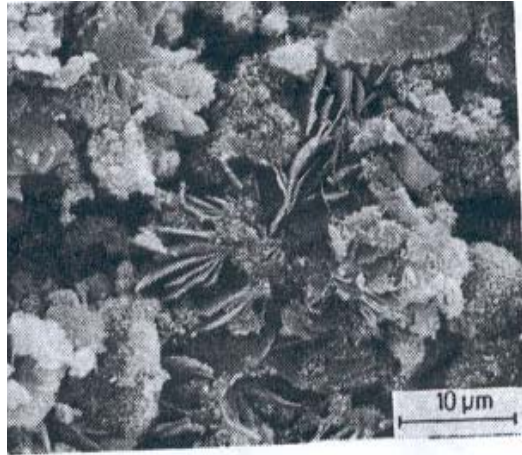
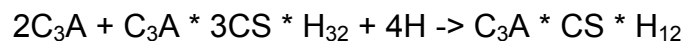


Figura 18. Superficie fracturada de cemento blanco un día de edad



Dentro de la cáscara, la concentración de solución de sulfato se desvanece rápidamente mientras la fase de aluminato reacciona. Esto resulta de la reacción de la siguiente fase de aluminato con cualquier Aft presente en el interior de la cáscara para dar Afm correspondiente a la reacción (ignorando cualquier sustitución de hierro):



El calor producido por esta reacción es a veces visible como un pico bajo y amplio en la evolución del calor³⁵. La conversión directa del AFt en ausencia de la fase de aluminato no ocurre aparentemente en el cemento. En las superficies fracturadas el AFm puede ser observado dentro de la cáscara hidratante y el AFt afuera en el mismo espécimen (figura 17)^{6,30}.

Sin embargo, si la concentración de los iones de sulfato en solución colapsa antes de que las cáscaras hidratantes han espesado y aislado parcialmente los granos hidratantes, se pueden formar placas mucho mas amplias de AFm a través de la pasta, como se puede observar en algunos cementos blancos que no contienen fases ferritas (figura 18)⁶.

La fase de belito aparentemente juega un papel muy importante en la reacción temprana de la hidratación. Pequeñas regiones de belito dentro del alito pueden quedar sin reaccionar (figura 15). Después de aproximadamente 14 días, las superficies de partículas de belito reveladas en las superficies fracturadas muestran signos de una reacción local (figura 19)³⁵, aunque después de varios meses todavía existe una hidratación relativamente pequeña alrededor de las partículas (figura 20). Esta reacción ocurre principalmente a lo largo de los límites gemelos. En una pasta de 23 años de edad, los granos de belito se han hidratado completamente, aunque la laminación original de la estructura gemela es aun conservada (figura 21)³⁷. Esto sugiere que la hidratación ha ocurrido topoquímicamente, como lo sugieren originalmente Funk³⁸ y McConell³⁹. La fase de ferrito aparece virtualmente sin reacción en las imágenes bse de las superficies pulidas (figura 22), incluso en pastas de muchos años de edad. El examen detallado de una pasta de 23 años de edad³⁷, revela dos distintas regiones en las áreas ricas en hierro. Es posible que hayan algunas lixiviaciones de calcio y aluminio de la capa exterior que deja óxido ferroso acuoso y amorfo. Si las fases intersticiales están íntimamente mezcladas, la reacción de la fase de aluminato quedará probablemente restringida.

Figura 19. Cristal de Belle revelado en la fractura de la superficie de una pasta de cemetno con 14 días edad, (Cortesía de A. Ghose)

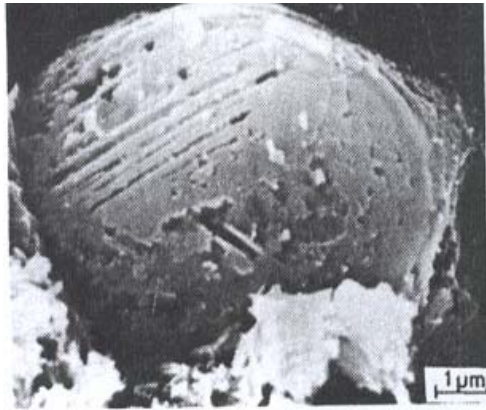


Figura 20. Cristal de belite en una exhibición de 3 meses

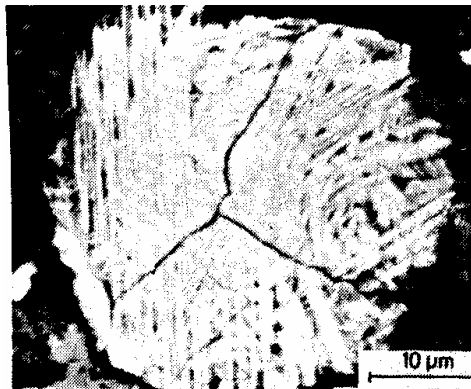


Figura 21. Reliquia de cristal de belite de 23 años ha reaccionado totalmente la pasta de cemento

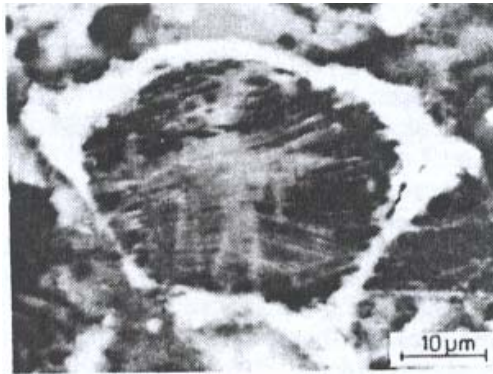


Figura 22. Reliquia de granos alargados de un año de antigüedad de la pasta de cemento

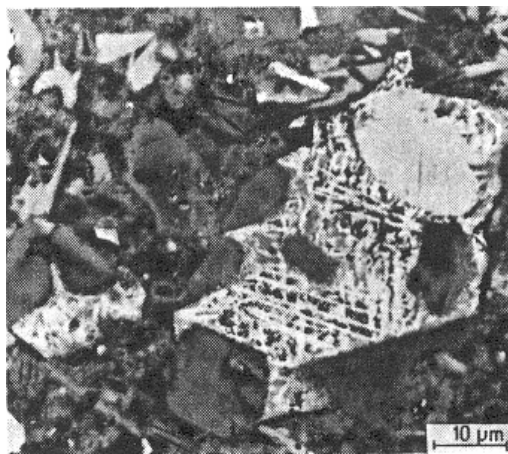
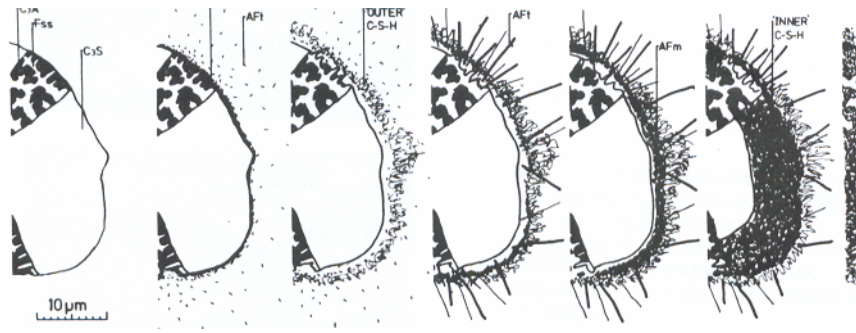
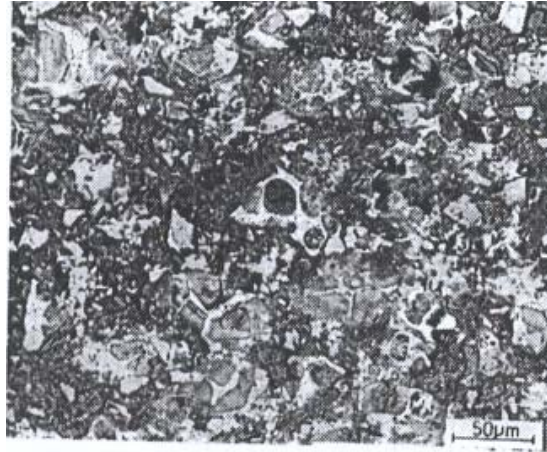


Figura 23. Resumen del desarrollo microestructural para un grano de cemento



La figura anterior se puede describir de la siguiente manera de izquierda a derecha: (a) La sección hidratada del grano de polimineral (la escala de esta fase intersticial se exagera ligeramente). (b) -10 minutos. Algún C₃A (y / o Fss) reacciona con el sulfato de calcio en la solución. Los formularios amorfos, de aluminato ricos de gel en la superficie y el nucleato de las varas cortas de AFt al borde del gel y la solución. (c) -10 horas. La reacción de C₃S para producir " producto exterior" C-S-H en red la vara AFt que deja 100μm entre la superficie del grano y la cáscara hidratada. (d) -18 horas. La hidratación secundaria de C₃A (y / o Fss) produciendo las varas alargadas de AFt de C-S-H donde el producto interno empieza a formarse dentro del C₃S de la cáscara continua hidratándose. (e) 1- 3 días de C₃A reacciona con cualquier AFt dentro de la cáscara que forma platos hexagonales de AFm. La formación continua del " producto interno" reduce la separación del grano anhidro y la cáscara hidratada. (f) -14 días. Es suficiente " internamente" el C-S-H que se ha formado para rellenar el espacio entre el grano y cáscara. " exteriormente" C-S-H se ha puesto mas fibroso.

Figura 24. Microestructura de pasta de cemento de 23 años



2.3 El efecto de reemplazos minerales en la microestructura

Existen varios minerales que son frecuentemente utilizados en el concreto como un reemplazo parcial del cemento. Estos minerales tienen cierta capacidad de hidratación, y usualmente reaccionan con el hidróxido de calcio, para resultar en un producto que llena espacios y así refinar la porosidad de la pasta. Los minerales más utilizados son las cenizas volantes, escoria de alto horno, y humo de sílice. El primero de estos se utiliza generalmente en reemplazos en niveles de hasta 30%. El segundo, en niveles de 40% y 70% para diferentes aplicaciones. Con estos dos minerales el desarrollo de la microestructura de la pasta durante la hidratación es ligeramente diferente del patrón previamente descrito. Con el tercero de estos minerales, el reemplazo es mucho más pequeño, normalmente alrededor de 10%, pero los efectos en el desarrollo microestructural, son mucho más dramáticos.

Las cenizas volantes es un producto resultante de la quema de carbón en estaciones de poder y consiste en pequeñas partículas esféricas con una distribución del tamaño de partícula similar a la del cemento anhidro. Alrededor del 80% de esta ceniza es cristal reactivo de la sílice que contiene calcio, aluminio, hierro, y otros óxidos menores. El contenido cristalino es comúnmente mulito, ferrito y cuarzo. En la pasta de cemento los componentes vidriosos de la ceniza volante experimenta una reacción puzolanica con el hidróxido de calcio producido por el cemento para dar el C-S-H.

Desde el punto de vista de desarrollo microestructural, la ceniza volante empieza a reaccionar únicamente después de varios días de hidratación, a pesar de que las impurezas tales como los sulfatos alcalinos, pueden afectar la hidratación del cemento desde antes. Sin embargo, deposiciones de C-S-H y AFt de la reacción del cemento pueden ser observadas sobre la superficie de las partículas de ceniza, casi inmediatamente en la célula ambiental (figura 25) y después de varias horas que las superficies de fractura^{42,43}. Después de varios días, la disolución de la fase cristalina puede ser observada sobre las superficies fracturadas, en donde el material cristalino ha sido expuesto en algunas de las partículas mas grandes (figura 26)⁴⁴. Los bordes del producto hidratante también pueden ser observados alrededor de las partículas de ceniza volante sobre superficies fracturadas y en las imágenes bse de secciones pulidas (figura 27).

Figura 25. Granos de cemento depositados en la superficie de una partícula de ceniza volante



Figura 26. Partículas volantes sobre superficie fracturada de pasta de cemento, (cortesía de Y. Halse)

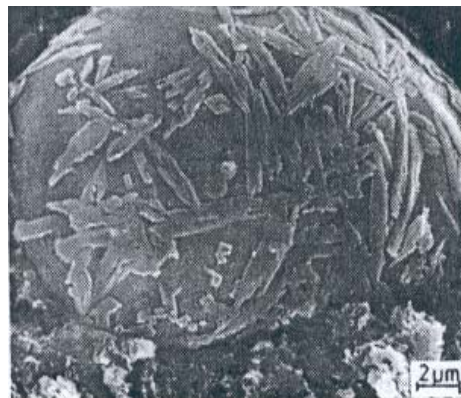


Figura 27. Partículas de ceniza son visibles en una región de hidróxido de calcio de una pasta de cemento

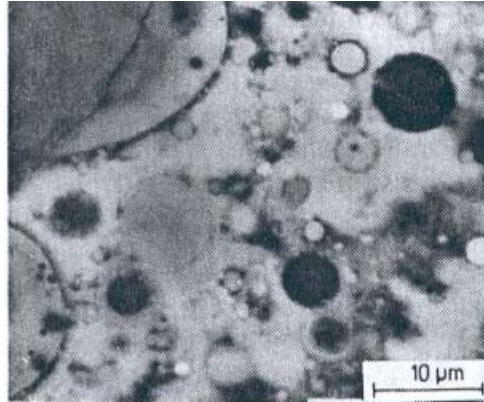


Figura 28. Pasta de cemento, crece masa de hidróxido de calcio alrededor de granos de escoria angular, (cortesía M. P. Cook.)

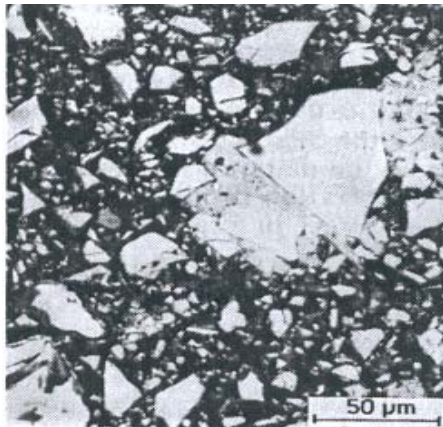
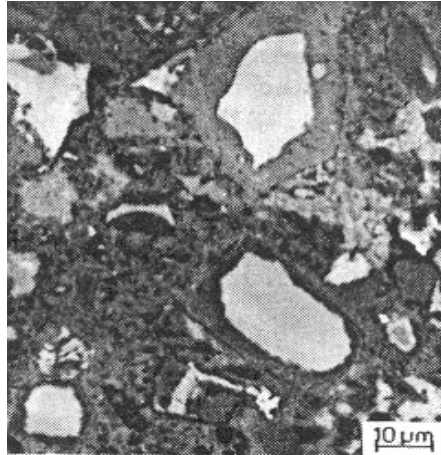


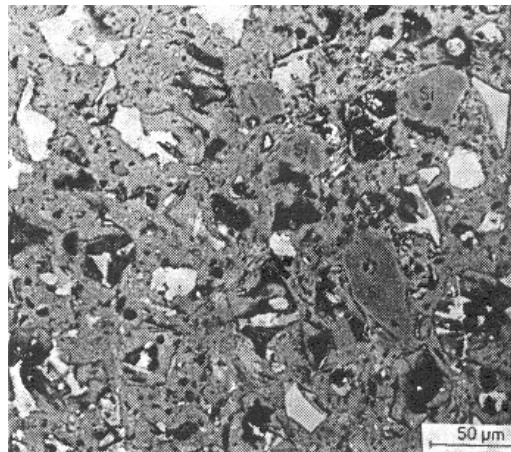
Figura 29. Granos de cemento y escorias parcialmente hidratados



La escoria del alto horno alto tiene un contenido de aprox. 90% de vidrio de composición típica: 35% SiO_2 , 45% CaO , 10% Al_2O_3 , 8% MgO , y pequeñas cantidades de otros óxidos. A pesar de que la escoria tiene cierta hidratación inherente, es necesario un activador (como el hidróxido de calcio), y la escoria juega un rol activo muy pequeño en el desarrollo microestructural temprano. Sin embargo, sí parece tener cierto efecto en la distribución de hidróxido de calcio. En las imágenes de la pasta de cemento escoria (figura 28) es notable que grandes masas de CH han sido formadas alrededor de las partículas de escoria. Después de varios meses, la escoria reacciona lentamente y la cantidad de hidróxido de calcio disminuye. En pastas viejas se pueden observar bordes reaccionados alrededor de las partículas de escoria (figura 29); éstas son más oscuras (con un número atómico menor) que el producto hidratante alrededor de las partículas de cemento y contienen cantidades significativas de MgO ^{45,46}. El humo de sílice consiste de minúsculas partículas (~0.1 micrómetro) de sílice amorfa. La superficie alta del área del humo significa que éste reacciona mucho más rápido que la ceniza y la escoria.

Debido a que es muy difícil dispersar el humo de sílice, en la práctica siempre se le añaden súper plastificantes a este tipo de mezcla. Varios trabajadores han notado que la microestructura de pastas que contienen humo de sílice es muy diferente de la que se desarrolla en las pastas de cemento ordinarias^{47,48}, teniendo una apariencia densa y amorfa. La imagen microscopio electrónico de barrido (bse) de una pasta madura de cemento / humo de sílice (figura 30)⁴⁹, ilustra esta microestructura densa. A pesar del uso de súper plastificantes, algunos grupos de humo todavía están presentes (marcados Si en el micrógrafo). Algunos granos grandes de cemento han sido hidratados dejando poros huecos que contienen una fase de ferrito sin reaccionar. Las razones de estas diferencias en el desarrollo microestructural todavía no han sido completamente comprendidas. El humo de sílice también posee una profunda influencia en la microestructura de la interfase entre la pasta de cemento y sus agregados, los cuales serán discutidos posteriormente.

Figura 30. Sección pulida de una pasta de cemento/humo de sílice



2.4 La caracterización de la microestructura de la pasta global

En las secciones anteriores, el desarrollo de la microestructura fue descrito principalmente en términos de cambios locales, los cuales ocurren alrededor de granos individuales de cemento durante la hidratación. La microestructura resultante de una pasta determinada dependerá de:

1. Las fases presentes y su distribución entre los granos
2. La distribución de granos por tamaño
3. La cantidad de reacción (dependiendo de la edad, estado de humedad y temperatura)
4. La razón agua / cemento

Las primeras dos son determinadas por el polvo de cemento anhidro, cuya caracterización ya se ha discutido. El tamaño del grano, en conjunto con el grado de reacción es particularmente importante para determinar la distribución del producto de C-S-H en la microestructura. Como ya se ha indicado previamente, los granos menores de 5 micrómetros (aprox.) 6% del total) serán hidratados completamente durante el momento de mas calor para darle C-S-H “exterior” al espacio originalmente llenado con agua. Granos entre 5 y 15 micrómetros (30% aprox.) habrán reaccionado después de 7 días para dar el C-S-H “externo” y “a través de la solución interna. Sólo el centro de los granos mas grandes de 15 micrómetros serán eventualmente hidratados para dar un C-S-H “interno de estado sólido”.

La razón agua / cemento determinará la cantidad de espacio llenado con agua en las pastas de cemento frescas; para una relación a/c de 0.5 el mismo será de 60% aprox.

En edades tempranas el efecto de la razón en la apariencia de las superficies fracturadas es ligeramente dramático (figuras.31 y 32). Después de 18 horas, la fractura de la pasta de cemento con razón de 0.5 está casi completada (figura 31), mientras que en la pasta con a/c de 0.3 el espaciamiento menor de los granos de cemento significa que ha ocurrido mas vinculación y mas fractura a través de las cáscaras, revelando mas centros anhidros sobre la superficie fracturada (figura 32). En edades posteriores el efecto de la razón es menos obvia en la microestructura.

Figura 31. Superficie fracturada de una pasta de cemento a razón de 0.5% de hidratación durante 18 horas

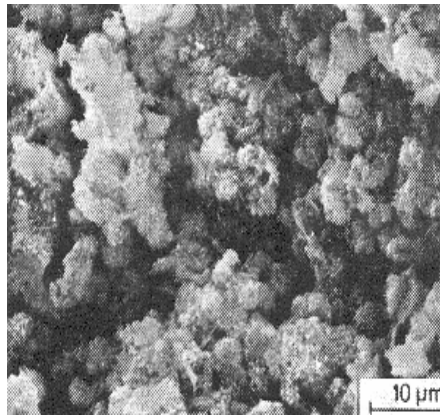
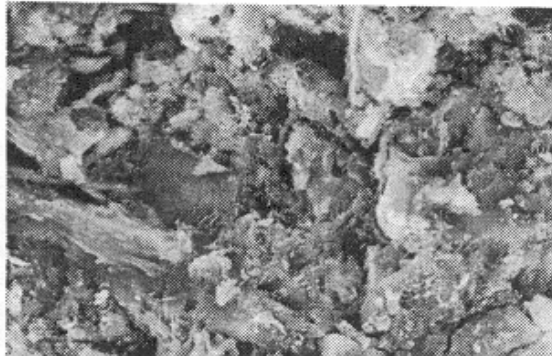


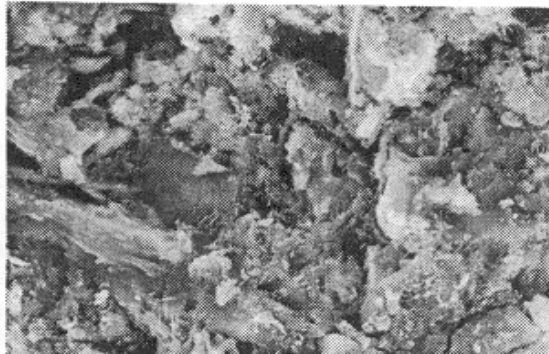
Figura 32. Superficie fracturada de una pasta de cemento a razón de 0.3% de hidratación



Dados estos factores, es necesaria una descripción cuantitativa de la caracterización microestructural. El medio mas simple para la cuantificación es determinar las proporciones relativas de los constituyentes presentes. El nivel de contraste de grises entre los constituyentes microestructurales en una imagen bse hace posible una discriminación por un analizador automático de imágenes, como está ilustrado en la figura 33. Este método puede ser utilizado para medir las cantidades de material anhidro, hidróxido de calcio masivo, otros productos hidratantes y poros. Si se analiza un área suficientemente grande, las cantidades determinadas serán representativas. A pesar de que las mismas cantidades pueden ser medidas por técnicas indirectas, se deben usar varias técnicas para medir todos los constituyentes. Un estudio muestra esa medición de las cantidades de material anhidro sin reaccionar por un análisis de imágenes bse, da resultados comparables a los valores medidos por pérdida de ignición (figura 33 f)²².

Las medidas de la porosidad por el método de análisis de imágenes fueron menores que las obtenidas por el reemplazo de metanol, debido a la resolución limitada (0.5 micrómetros) de las imágenes bse a la magnificación utilizada (x 400). Sin embargo, hubo una buena proporción entre dos juegos de medición para pastas a un amplio rango de edades y relaciones de a/c (Figura 33 g). También debería ser posible determinar la cantidad de hidróxido de calcio por este método, pero debido a la distribución dispareja de esta fase, las mediciones deben ser realizadas sobre un área mayor que la que fue hecha en este estudio.

Figura 33. Constituyentes microestructurales en una pasta de cemento



De la figura anterior se puede definir el siguiente análisis. A) Imagen bse de una pasta de 28 días; B) histograma de niveles de gris, que muestra cimas de: material anhidro (AM), hidróxido de calcio (CH), y otros productos hidratantes; C) material anhidro; d) hidróxido de calcio; e) porosidad; F) Comparación de material anhidro medido por análisis de imagen y por pérdida en la ignición; G) comparación de porosidad por análisis de imagen y absorción de metanol.

La importancia de análisis de imágenes desde el microscopio electrónico de barrido (bse) reside en el potencial que ofrece para obtener una descripción cuantitativa de la distribución de los constituyentes microestructurales. La elección de parámetros aceptables para caracterizar una distribución debe ser considerada cuidadosamente, y la mejor estrategia dependerá de la naturaleza de la distribución y el propósito final de la caracterización. También es importante comprender los problemas estéreos lógicos relacionados al tratar de derivar información acerca de las distribuciones tridimensionales del estudio de las secciones bidimensionales.

El material anhidro existe en partículas discretas. En este caso la distribución de los tamaños de partículas debe ser conveniente para ciertas aplicaciones, mientras que para otros, el área de superficie total de los granos o la uniformidad de la distribución en el espacio debe tener una descripción apropiada de la microestructura.

En contraste, los poros en la pasta de cemento tienen una influencia importante en ciertas propiedades como la permeabilidad. En este caso la distribución por tamaño de los poros y la conectividad medida en las secciones bidimensionales puede llevar una pequeña o inexistente relación con la estructura tridimensional de los poros. Para algunos propósitos, la caracterización de la superficie de los poros puede ser más apropiada y ciertos conceptos como pueden ser importantes como las fracturas.

La distribución del hidróxido de calcio posee problemas similares debido a la tortuosa forma de las masas cristalinas. En éstas la densidad de los puntos de nucleación puede ser un importante parámetro, que puede ser estimado por un análisis de las distancias vecinas más cercanas.

Está claro que hay mucho todavía por hacer en esta área, pero con un trabajo básico apropiado debería ser posible establecer modos de caracterización de la micro estructura de una pasta de cemento, la cuál fomentará la comprensión de su comportamiento.

3 CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO EN CONCRETO

3.1 Los agregados

En la producción de concreto es utilizado un rango muy amplio de agregados. Empíricamente, se han establecido varios factores que afectan la capacidad de trabajar el concreto fresco y la durabilidad de la estructura endurecida⁵². Estos factores deben ser resumidos como aparece a continuación:

Características físicas de las partículas agregadas: la distribución por tamaño de partícula (calificación); la forma de la partícula; la textura de la superficie de la partícula. Impurezas y contaminantes: arcilla, y polvo; materia orgánica; yeso, mica, cáscara; sulfatos y cloruros; impurezas metálicas, en particular óxidos de plomo y zinc.

Estabilidad mecánica y química: fuerza mecánica; susceptibilidad de reacción con álcalis; validación de congelamiento y descongelamiento.

Durante las primeras etapas de la hidratación, los agregados no juegan un rol activo en el desarrollo microestructural. Así, en ausencia de cantidades significativas de impurezas y contaminantes, las propiedades físicas de los agregados son lo mas importante. En particular, la gradación de los agregados afectará el embalaje de las partículas en el concreto y en el área superficial de los agregados los cuales deben ser cubiertos con la pasta de cemento.

Es muy difícil caracterizar ciertos aspectos como las formas de las partículas o las texturas, de una manera cuantitativa; particularmente, una superficie debe ser descrita como áspera en diferentes escalas. Ejemplos de los agregados utilizados más comúnmente se muestran en la figura 34 a) y b). El de la figura 34 a) es un agregado natural de grava; las partículas son generalmente redondas y poseen un amplio rango de textura superficial. El otro agregado es una roca machacada de granito. En este caso las partículas son angulares y la superficie es más uniforme. La apariencia manchada indica su naturaleza poliminerálica. La figura 35 muestra la superficie de un fino agregado de arena tomado por microscopio electrónico de sondeo (SEM); algunas partículas son ligeramente lisas, mientras que otras tienen más agujeros.

En períodos de varios años, algunos agregados pueden sufrir reacciones químicas. La más seria de estas reacciones es la del álcali (AAR), en la que los componentes del agregado reaccionan con el álcali en la pasta de cemento para formar un gel, el cual puede acarrear agua e inflamación, causando rajaduras en el concreto. El álcali (AAR) es comúnmente usado junto con la presencia de sílice cristalina amorfa en el agregado pero también se ha reportado con agregados carbonatados.

Figura 34. Fotografías de a) grava y b) granito machacado. (cortesía de A.K. Crumbe.)

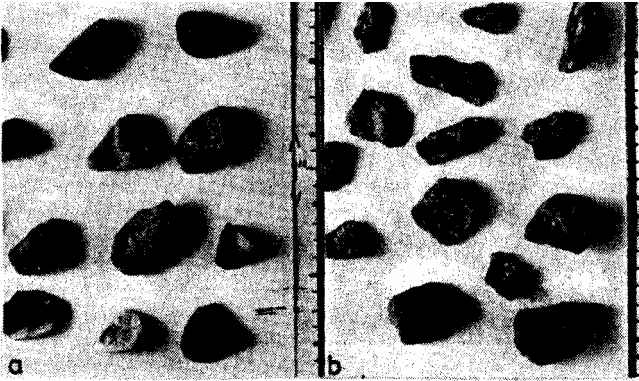
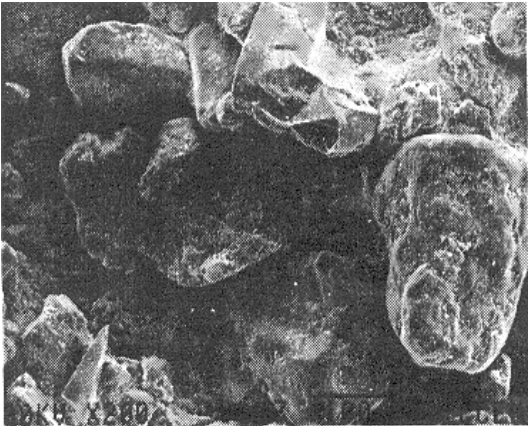


Figura 35. Micrográficas de partículas de arena



3.2 La pasta de cemento en la interfaz de los agregados

La interfaz entre la pasta de cemento y los agregados no puede ser estudiada aisladamente ya que existe solamente como regiones localizadas en la microestructura de concretos y morteros. Esto hace que las técnicas microscópicas sean muy satisfactorias para el estudio de esta región. Exámenes de las superficies fracturadas⁵³ y superficies pulidas⁵⁴ por el microscopio electrónico de sondeo (SEM), y secciones enrarecidas de iones por microscopio electrónico de transmisión (TEM)^{17,18}, han sido reportadas. Sin embargo, debido a las dificultades al tratar de obtener información cuantitativa de estudios microscópicos^{55,60}, muchos trabajadores han usado el espécimen del concreto “modelo”, desarrollado por Farran⁶¹ para estudiar la interfaz. En este espécimen, la pasta de cemento es hecha sobre un pedazo grande de agregado. Después de un debido período de hidratación, el espécimen puede ser fracturado en la interfaz y las superficies producidas pueden ser examinadas por el microscopio electrónico de sondeo (SEM). La concentración y orientación de las fases en la región interfacial pueden ser analizadas por la técnica desarrollada por Grandet y Ollivier^{55,57}, la cual implica una abrasión sucesiva del lado de la pasta de cemento de la interfaz y examen de la fase presente en la superficie durante la difracción por rayos X. Este tipo de espécimen también facilita el examen microestructural por el microscopio electrónico de sondeo (SEM), cuando es fracturado a lo largo de la interfaz. En un modelo de concreto existen varias desventajas para la configuración de este espécimen. Primero, la superficie del agregado es generalmente lisa y pulida, segundo, el agregado no está presente durante el proceso de mezclado, y tercero, existe un espesor considerable entre las partículas del agregado y del concreto.

Figura 36. Capa de cemento depositado sobre la superficie de un agregado

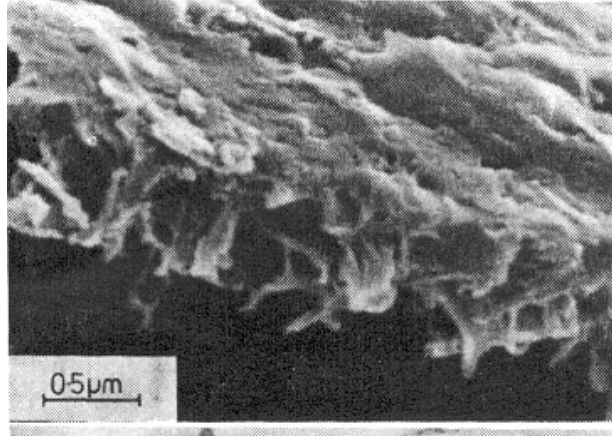


Figura 37. Microestructura del borde de un grano



**Figura 38. Zona de contacto entre calcita y pasta de cemento
(Cortesía de J. P. Ollivier)**

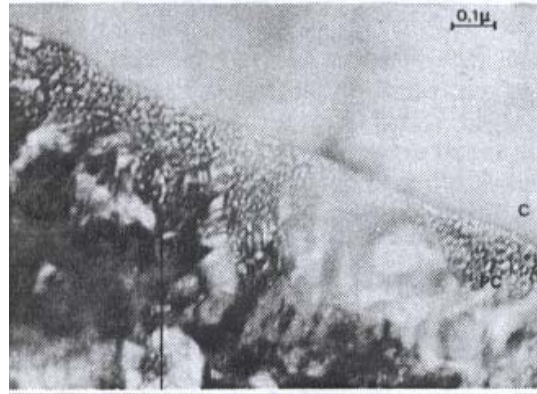
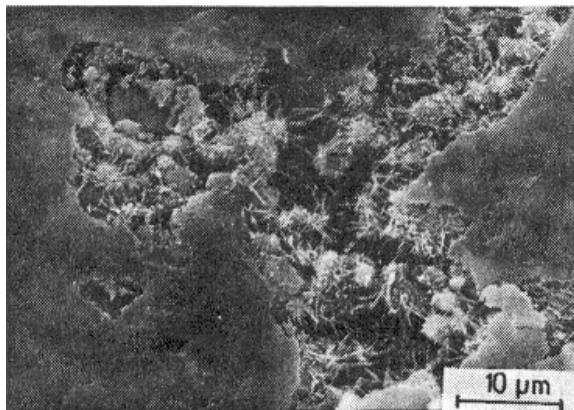


Figura 39. Capa delgada del producto hidratante sobre el agregado



Después de esta capa de producto existe una región de alta porosidad que es conocida como la “aureola de transición”. Esta se presenta porque los granos grandes de cemento no pueden juntarse con las partículas del agregado.

En especímenes compuestos esta región se caracteriza por su orientación preferiblemente de hidróxido de calcio con el eje C paralelo a la superficie del agregado, y por aumentadas concentraciones de AFt⁵⁵⁻⁵⁸ las cuales se extienden unos 50 micrómetros en la pasta de cemento. En superficies fracturadas de concretos y morteros, esta región se puede ver a través de aperturas en la superficie de la capa, en donde está incompleta o permanece pegada a las partículas del agregado (figura 39). En esta región hay varios rosetones de C-S-H de la hidratación de los granos menores y un gran número de barras de Aft. En las imágenes bse de secciones pulidas, la distribución de los granos de cemento, se puede observar directamente o deducir de los vestigios de especímenes maduros. La figura 40 muestra la región interfacial en un mortero de un día. Hay un par de granos grandes cerca de la interfaz y, en este caso, aparece una concentración de pequeños granos y grietas de las partículas del agregado, las cuales probablemente fueron acumuladas mientras el mortero se mezclaba. Los numerosos pequeños granos cerca de la interfaz llevan a que varias cáscaras hidratadas huecas puedan ser observadas en esta región interfacial que aun puede ser vista en especímenes maduros (figura 41). Probablemente no es coincidencia que la primera observación de Hadley encontrara cáscaras hidratadas (granos Hadley) mientras estudiaba las regiones artificiales de el concreto³⁴. Como se discutió anteriormente, hay tendencias de que hayan mayores proporciones de fases intersticiales expuestas en las superficies de los granos mas pequeños, los cuales contarán como la mas alta concentración de AFt que se puede observar en esta región. En imágenes bse, los cristales de hidróxido de calcio se pueden observar en la región interfacial (figura 40), pero es dificultoso identificar una orientación.

Como los constituyentes microestructurales pueden ser distinguidos en imágenes bse de secciones pulidas de concreto, esta técnica puede ser usada para caracterizar la micro estructura de la región interfacial cuantitativamente en concretos reales. con un analizador de imágenes automático, las cantidades relativas de los constituyentes pueden ser medidos en bandas fuera de la superficie, como es ilustrado en (figura 42)⁶⁴. Sin embargo, estas secciones de concreto, el ángulo donde el agregado de superficie en intercepta en un punto de la sección es desconocida, y la distancia normal en las secciones agregadas a un punto en la sección puede ser solamente estimado.

Figura 40. Poca cantidad de granos grandes de cemento cerca del agregado (interfaz)

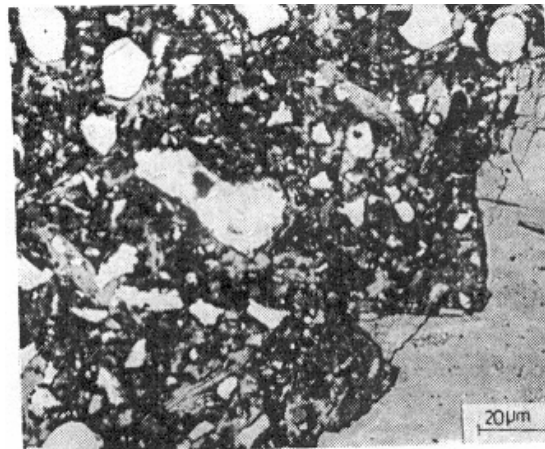
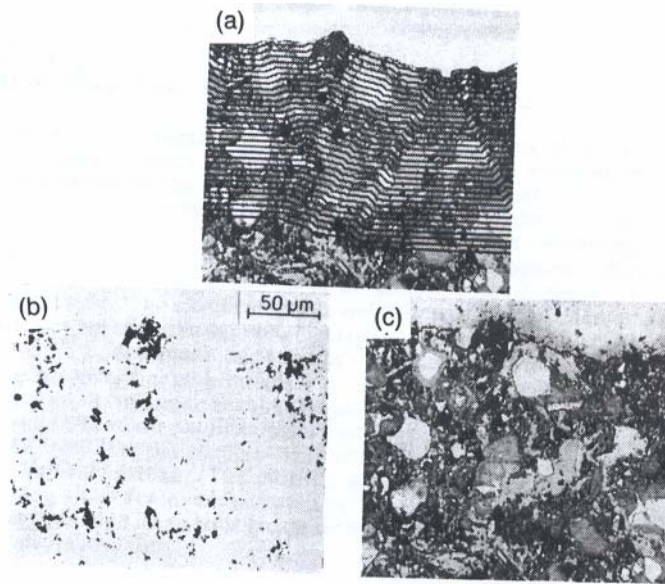


Figura 41. Región interfacial de 10 semanas del espécimen compuesto



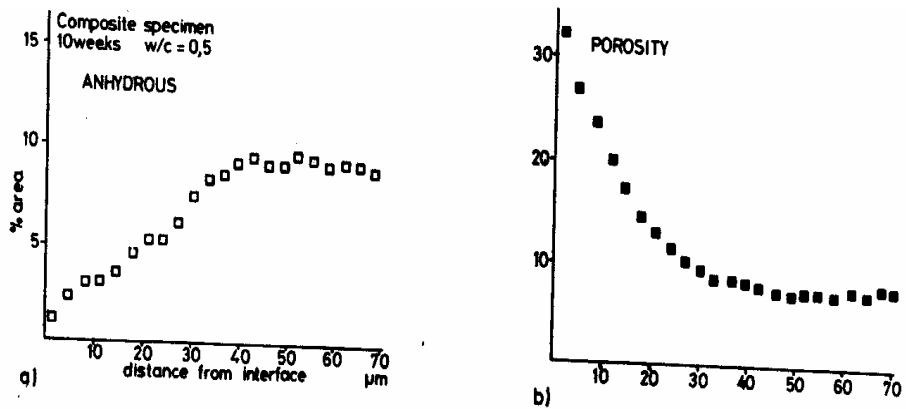
En orden para evadir este problema, prepararon especímenes en donde únicas piezas de agregados fueron probadas en bloques de cemento⁶⁵. Estas secciones fueron cortadas después por los especímenes, normalmente para ser superficies agregadas. Estas superficies fueron analizadas. Un pequeña incremento de hidróxido de calcio cerca de la interfase se puede observar pero no fue significativa como para cambiar el resultado. En términos de concreto simulado, estos especímenes tienen una ventaja entre otros especímenes quienes usan una pieza delgada de agregado, por medio de la utilización de una superficie agregada. Sin embargo, el agregado no está presente mientras se unen todos los materiales. La acumulación de pequeñas partículas en la superficie de el de agregado vistas en la figura 40 indica ese movimiento de las partículas de agregado por medio de la pasta durante la combinación tiene un efecto en la micro estructura de la fase interfacial.

Figura 42. Medida de pendientes microestructurales en la región interfacial



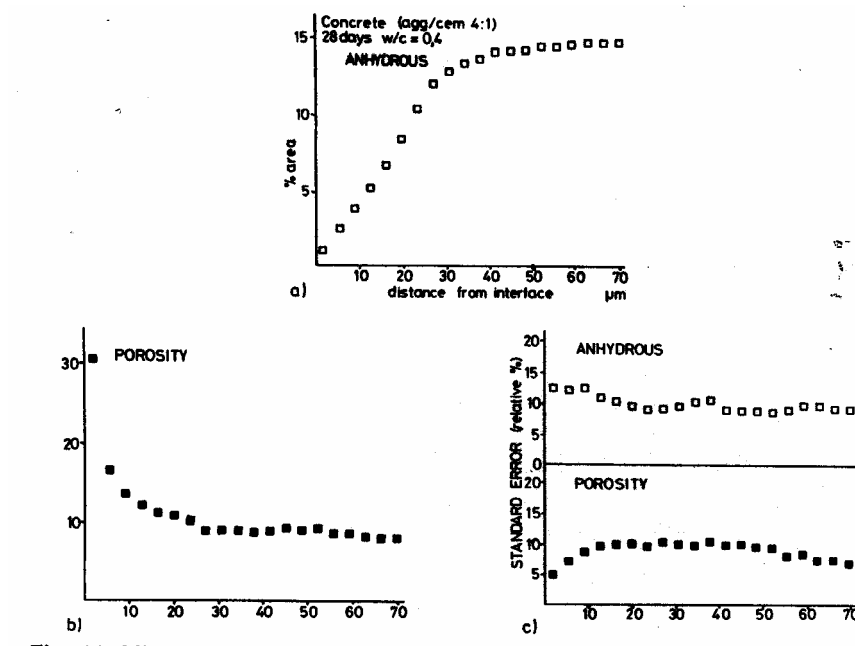
De la figura anterior se puede definir lo siguiente: (a) la imagen de bse con las partícula del agregado a la cima de la micrográfica; (b) la porosidad descubierta en la pasta de cemento; (c) las líneas negras indican las bandas en que los electores microestructurales son moderados.

Figura 43. La pendiente microestructural de la región interfacial compuesta 10 semanas antes



De la figura anterior según los exámenes realizados por Scrivener y Gartner⁶⁵, los resultados trazados son las medidas de los 10 campos en cada uno de tres agregados diferentes. (a) el material Anhidro, (b) la porosidad.

Figura 44. Pendiente microestructural región interfacial promedio 50 campos. (a) material anhidro, (b) porosidad y (c) error normal



3.3 El efecto de humo de sílice en la interfaz de los agregados

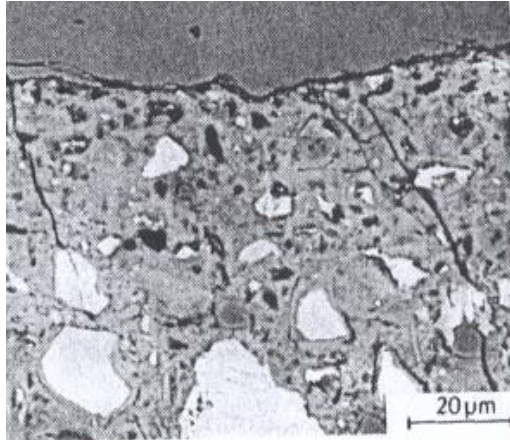
Es considerablemente interesante en la incorporación de humo de sílice para producir cemento de alta resistencia. El reemplazo de material aparece teniendo un efecto en la microestructura de la región interfacial, consiste en la microestructura observada en el humo de sílice / pasta de cemento.

La figura 45 demuestra la microestructura de la zona Interfacial en el humo de sílice, que generalmente es densa aparece generalmente la microestructura. En contraste con la pasta equivalente, el humo de sílice fue bien disperso en el cemento^{49,65}. Scirvener y Bentur⁴⁹ analizaron los grados de la microestructura de las zonas interfaciales con y sin humo de sílice. En ambos casos fue similar como en otros casos observados. (figura 43(a) y 44(a)) Esto consiste en una vista de la distribución de las partículas en el cemento que determinan la fase interfacial. El grado de porosidad era menos en el concreto que contenía humo de sílice, como es indicado en la micrográfica (figura45); que supone que las pequeñas partículas de humo de sílice acumulado en la región interfacial es cuando se mezcla.

3.4 La microestructura global del concreto

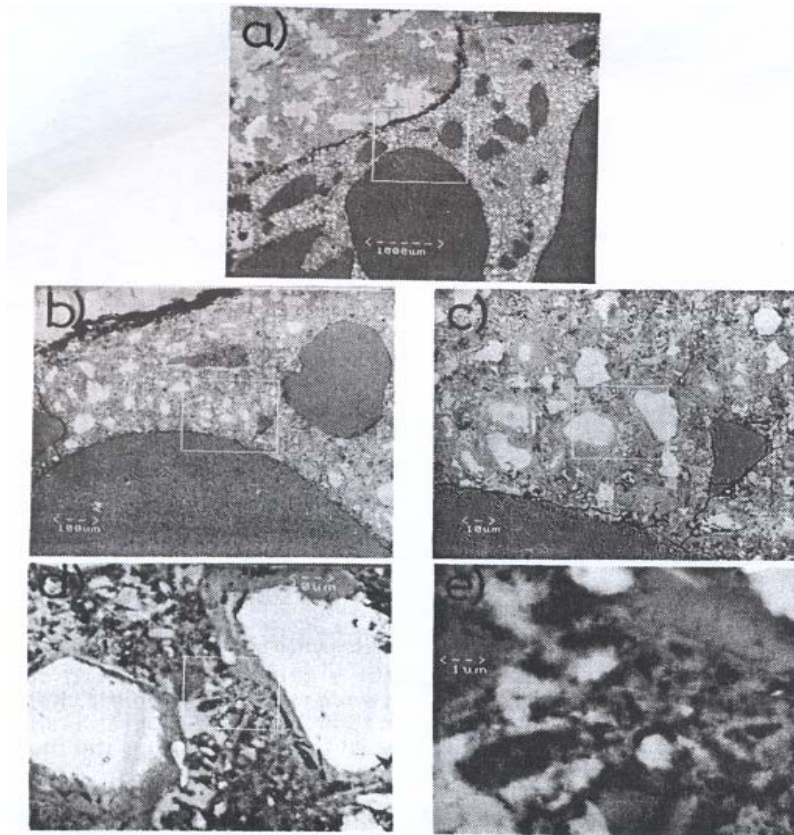
La microestructura de hormigón es un material compuesto de, agregados, pasta de cemento, la interfaz entre ellos. La complejidad detrás de esta declaración puede ser apreciada observando la sucesión de micrográficas mostrada en figura 46 cada uno de los cuales se tomó de la misma área en aproximadamente cuatro veces la amplificación.

Figura 45. Región interfacial de humo de sílice en el hormigón



De la figura anterior la microestructura es densa y no hay grupo de humo de sílice alguna como visto en la pasta de humo de cemento/silica (Figura30). La hidratación de pequeños granos de cemento han dejado algunos poros adjuntos.

Figura 46. Microestructura del hormigón



De la figura anterior la microestructura del hormigón para (180 días) queda de la siguiente manera: (a) el magnificación nominal (NM) x 25. Una partícula grande de agregado de granito y pequeñas partículas de agregado pueden ser observadas en la matriz de la pasta de cemento. (b) NM x 100; la distribución de la pasta de cemento anhidro puede ser mas clara. Hay material anhidro muy pequeño en la cinta estrecha de la pasta entre dos granos de arena al derecho de la micrográfica. (c) NM x 400; La distribución de hidróxido de calcio y poros grandes en la pasta de cemento puede verse. (d) NM x 1600 Microestructura entre dos granos de cemento parcialmente reaccionados. (e) NM x 6000 microestructura detallada del producto de hidratación.

La caracterización de la microestructura de concreto trae consigo la caracterización de la pasta de cemento y la pasta / agregado que ya tiene resultados. Además, la distribución de las partículas del agregado y la incidencia de rasgos como el aire nulo y sangrado deben ser considerados. En el caso de estructuras concretas leídas, la microestructura estropea la variación a lo largo de la sección del lanzamiento. Es esencial tomar cuenta que la microestructura del material cerca de la superficie, toma un papel crucial en lo que es la protección del acero reforzado.

Una capa exterior de pasta de cemento, entre (0.1 a 0.3) mm de espesor bajo que es 3 mm la capa espesa del mortero. La proporción agua / cemento también varía esto aparece en las capas^{67,68}.

El hecho que estos fenómenos producen variaciones en la microestructura, el espacio indica esa microscopía cuantitativa (ambos óptico y con el microscopio electrónico de barrido juega un papel importante caracterizando y entendiendo la región de la superficie del hormigón.

La microestructura del hormigón continúa cambiando a lo largo de su vida, debido no sólo al continuar la hidratación sino también a los efectos del ambiente. En lo particular, el ingreso de otros compuestos como el anhídrido carbónico estropea microestructura^{69,70}.

A pesar de muchas complejidades, la caracterización microestructural "buena" del hormigón, no es una meta poco realista. En las condiciones cualitativas, la manera en que la microestructura se desarrolla durante la hidratación del cemento y el hormigón se entiende justamente bien.

Lo que se necesita ahora es descripciones mas cuantitativas de la microestructura que puede relacionarse a su conducta. Ellos necesariamente no traerán consigo cuantificación completa de cada detalle, pero sólo entendiendo el contexto global de donde se establezcan métodos útiles para la caracterización.

4. DURABILIDAD DEL CONCRETO

4.1 Procesos químicos de deterioro en el hormigón

Los procesos de deterioro del hormigón provocados por reacciones químicas están vinculados, por lo general, a las interacciones químicas entre los agentes agresivos del ambiente externo y los constituyentes de la pasta de cemento. Existen, sin embargo, algunas excepciones como las reacciones álcali agregados, la hidratación diferida de los óxidos cristalinos de calcio y magnesio (CaO, MgO) cuando se encuentran en excesiva cantidad y la corrosión electroquímica de las armaduras embebidas en el hormigón⁴.

Es necesario aclarar que cualquier acción de naturaleza química sobre el hormigón que tienda a disminuir la alcalinidad de la solución de poros (aguas puras o ligeramente ácidas), colocará al material en una situación de equilibrio químico inestable, deteriorándolo.

Tabla I. Reacciones, compuestos formados, fenómenos y alteraciones en el hormigón

REACCIONES	COMPUESTOS FORMADOS	FENÓMENOS	ALTERACIONES EN EL HORMIGÓN
A - Hidrólisis (lixiviación)	disolución de los compuestos de la pasta de cemento endurecida (CH, S-C-H)	Aumento de la porosidad y permeabilidad	Reducción de la alcalinidad Pérdida de la masa Aceleración del proceso de deterioro Reducción de la resistencia y rigidez
	Remoción de los iones Ca^{2+} como productos de reacciones solubles	Aumento de la porosidad y permeabilidad	Reducción de la alcalinidad Pérdida de masa Aceleración del proceso de deterioro Reducción de la resistencia y la rigidez
B - Intercambio iónico entre los componentes del fluido agresivo y los de la pasta de cemento hidratada	Remoción de los iones Ca^{2+} como productos de reacción insolubles no expansivos	aumento de la porosidad y permeabilidad	Reducción de la alcalinidad Pérdida de la masa Aceleración del proceso de deterioro Reducción de la resistencia y la rigidez
	Reacciones de sustitución que reemplazan los iones Ca^{2+} en el S-C-H	Modificación y debilitamiento de la estructura del S-C-H	Reducción de la resistencia y rigidez
C - Formación de productos expansivos (RAS, corrosión del acero, formación de yeso y/o etringita, hidratación del CaO y/o MgO del cemento	Poco solubles en agua y expansivos	Generación de tensiones internas	Reducción de la resistencia y rigidez Fisuras, pop-outs Descascaramientos Deformaciones

De la tabla anterior se concluye que nos muestra las reacciones, los compuestos formados, los fenómenos y alteraciones que se producen en el hormigón por el proceso químico de deterioro que este sufre.

4.2 Consecuencias en el concreto

- Disminución del PH
- Pérdida de la masa
- Incremento de la porosidad y la permeabilidad del hormigón
- Caída de la resistencia mecánica

4.2.1 Lixiviación

Es el proceso mediante el cual se produce la disolución de compuestos de hormigón en la fracción de cemento hidratado.

Depende de la situación o estado del agua: a) reposo b) corriente constante c) filtrante

En el caso a) la hidrólisis de los componentes con calcio alcanza la saturación (equilibrio químico)²⁰ y los procesos se detienen.

En los casos b) y c) la acción agresiva del agua aumenta, pues la posibilidad que ésta percole a través del hormigón, particularmente bajo presión, determina que los procesos de disolución y degradación sean continuos. Esta situación en particular da lugar a otro fenómeno que se enuncia a continuación: EFLORESCIENCIAS

El agua que filtra a través del hormigón, rica en CH disuelto, alcanza la superficie de la estructura y se evapora haciendo que los cristales de CH precipiten formando depósitos salinos de color blanco¹⁴. El fenómeno en si representa un problema estético mas que de durabilidad.

Sin embargo, indica que una importante lixiviación está ocurriendo en el hormigón.

4.3 Acción de las disoluciones ligeramente ácidas

El hormigón de cemento portland, en general, no resiste el ataque ácido excepto cuando estos provengan de soluciones ligeramente ácidas, particularmente cuando esté expuesto ocasionalmente.

La acción de los ácidos sobre el hormigón endurecido (considerado como sustancia alcalina) no es, ni mas ni menos, que la conversión de todos los compuestos cálcicos(CH, S-C-H, C-A-S-H) en sales cálcicas del ácido actuante¹⁴.

Cuando estas sales son de GRAN SOLUBILIDAD pueden ser removidas fácilmente por lixiviación incrementando la porosidad del material, destruyendo así la estructura del cemento endurecido.

Cuando las sales de calcio resultantes son de BAJA SOLUBILIDAD y además no experimentan cambios de volumen, la corrosión del hormigón es mucho mas lenta debido a la acción protectora de la película que forman dichas sales al precipitar sobre la superficie del hormigón⁴².

De este modo un parámetro muy importante como es la VELOCIDAD DE REACCIÓN está condicionado a los siguientes elementos:

- Agresividad del ácido
- Según sean ácidos fuertes o débiles
- Solubilidad de la sal cálcica resultante
- Condición o estado del agua (reposo, corriente renovada, filtrante)
- PH
- Temperatura
- Concentración de protones en la disolución

Tabla II. Relación de los ácidos que forman sales de calcio de características solubles e insolubles

ÁCIDOS QUE FORMAN SALES DE SOLUBLES	CALCIO DE CARACTERÍSTICAS INSOLUBLES
1- Clorhídrico	5- Carbónico
2- Nítrico	6- Fosfórico
3- Sulfúrico	7- Sulfuroso
4- Carbónico	8- Cítrico
	9- Tartárico y Oxálico

4.3.1 Características de los ácidos del cuadro anterior

1. Es un ácido fuerte y la solubilidad de la sal de calcio en agua a 0°C es 595 g/l. Luego de realizado el ensayo con martillo de rebote Schmidt en hormigones de distinta porosidad, se comprueba el alto grado de agresión producido. Es un ácido usualmente encontrado en industrias químicas.

2. Es un ácido fuerte y la solubilidad de la sal en agua a 0°C es de 1020 g/l. Al igual que el ácido anterior provoca una marcada disminución de la resistencia y se encuentra por lo general en las industrias químicas.

3. Es un ácido fuerte de características particulares, pues es muy agresivo para el hormigón, en cualquier concentración, a pesar de la baja solubilidad de sus sales resultantes. Ejerce una doble acción. Por un lado ataca la pasta de cemento debido a sus características ácidas. Por otra, puede dar lugar a la formación de yeso el cual, al reaccionar con los aluminatos de calcio hidratados forma etringita, produciendo una desintegración adicional a causa de la fisuración y del aumento de la porosidad.

5. Este ácido débil que presenta rasgos propios porque sólo forma sales con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y nunca con la alúmina. Puede encontrarse en concentraciones importantes en las aguas naturales, subterráneas, en agua de mar y en lugares donde se descomponen sustancias orgánicas por la acción de microorganismos. Es perjudicial cuando el PH es inferior a 7 pues estaría indicando concentraciones perjudiciales de CO_2 ³⁷. Este ácido experimenta dos equilibrios iónicos: para una pequeña concentración forma carbonato de calcio, para una concentración mayor, forma bicarbonato ácido de calcio que es soluble en agua con la característica de que esta reacción es reversible, de tal manera que con la presencia de determinada cantidad de CO_2 se produce un nuevo ataque al $\text{Ca}(\text{OH})_2$ del cemento hasta que se recomponga el equilibrio. El resultado final es la formación del bicarbonato de calcio soluble en agua y el ataque al hormigón.

Este CO₂ en exceso, sobre el CO₂ de equilibrio, capaz de transformar a todo o parte del carbonato de calcio formado en bicarbonato de soluble, se conoce con el nombre de CO₂ agresivo³⁸.

5. Según lo señalado anteriormente, si la concentración de CO₂ libre es menor que la de equilibrio (no hay CO₂ agresivo), el ácido carbónico reaccionará precipitando carbonato de calcio que colmata los poros del hormigón y produce un ligero incremento de la resistencia mecánica superficial⁵².
6. Ácido débil que experimenta tres ionizaciones.
7. Ácido débil que experimenta dos ionizaciones.
8. Ácido orgánico y débil.
9. El ácido Tartárico es orgánico y débil. El Oxálico es fuerte y también orgánico.

4.4 Acción de las aguas puras²³

Se considera que un agua es agresiva para el hormigón cuando esta:

- a) Tiene pocas o ninguna sustancia disuelta (aguas puras o desmineralizadas) actuando como disolvente en el hormigón (lixiviación).
- b) Tiene sustancias o compuestos capaces de reaccionar con los compuestos del hormigón como por ejemplo ácidos, sulfatos, sales, etc.

Por AGUAS PURAS se reconocen aquellas que tienen pocas o ninguna sustancia disuelta como por ejemplo:

- Deshielos de glaciares
- Fusión de nieve
- Agua de lluvia
- De determinados pantanos
- Aguas a grandes profundidades
- Provenientes de ciertos procesos de condensación industrial.

4.5 Características y acción de las aguas puras³⁰

- Bajo contenido de $Ca_2 +$ ó MgO
- PH próximo a 7 (ni ácidas ni básicas)
- Actúa como disolvente e inicia la hidrólisis (por percolación o saturación)
- Inicia la disolución de los compuestos que contienen calcio (Ca)
- Los aluminatos de calcio hidratados generan como productos finales gel de alúmina e hidróxido de calcio
- La desaparición del CH facilita el avance de la reacción disolvente
- Expone a los demás componentes a la descomposición química.

4.6 Ataque de sulfatos al hormigón³⁰

Probablemente, el ataque de los sulfatos constituya una de las formas más difundidas en el mundo de agresión química al hormigón.

Ámbitos propicios donde encontrar sulfatos:

- Se encuentran presentes en el suelo, particularmente los arcillosos
- Disuelto en el agua de las napas freáticas
- El agua de mar
- Otra fuente de aporte la constituyen los ambientes de descomposición orgánica, en procesos anaerobios donde se forma SH_2 , compuesto que puede transformarse posteriormente en ácido sulfúrico ($\text{SO}_4 \text{H}_2$) por acción bacteriológica.
- Ambientes urbanos o industrializados, con altos grados de polución ambiental (lluvia ácida).
- Puede formarse a partir de ciertos procesos biológicos que degradan lentamente al hormigón, incluso en aquellas estructuras que no se hallan en contacto directo con el suelo.

4.7 Características de ataque de sulfatos en el concreto

4.7.1 Acción de las sales en disolución acuosa

Las sales pueden clasificarse en neutras, ácidas o básicas, en función del PH resultante de su disolución acuosa.

Las sales neutras procedentes de un ácido fuerte y una base fuerte, cuando se disuelven en agua no experimentan reacción de hidrólisis y, por consiguiente, el PH de las disoluciones acuosas es igual a 7.

Las sales ácidas procedentes de un ácido fuerte y una base débil, cuando se disuelven en agua, descomponen el agua (hidrólisis) y proporcionando un PH menor a 7³³.

Para estudiar la acción de las sales, en disolución acuosa, sobre los compuestos del cemento portland se ha de tener en cuenta la correspondiente a los diferentes iones que proporcionen al medio acuoso. Así, en el caso de sales neutras, se debe considerar la acción del anión, por una parte, y la del catión, por otra. En los casos de sales ácidas, además de las acciones del catión y anión mencionadas, se deberá tener en cuenta el carácter ácido de los protones (H⁺) cedidos a la solución.

4.7.2 Recomendaciones y medidas prácticas⁴⁴

Factores que influyen y modifican el grado de ataque de aguas agresivas en contacto con el hormigón:

a) Por parte del hormigón³³

- Tipo y contenido de cemento
- Características de los agregados
- Dosificación, trabajabilidad
- Compacidad, permeabilidad, absorción (a/c)
- Existencia de defectos (fisuras)
- Curado o edad del hormigón a la que se pone en contacto con las sustancias agresivas, etc.

b) Por parte de la estructura²⁷

- Situación de la estructura (recubierta o embutida en terrenos permeables)
- Sumergida en agua
- Características geométricas, etc.

c) Por parte de las aguas agresivas³³

- Características de la solución (PH, residuo, contenido de CO₂ agresivo, dureza, tipo de aniones y cationes presentes, etc.)
- Situación de la solución (en reposo, agua corriente que se renueva permanentemente, que exista presión hidráulica unilateral, etc.)
- Duración del período de contacto de la solución con la estructura de hormigón
- Temperatura de la solución

d) En general:

- El hormigón de buena calidad, compacto y de baja relación agua / cemento (baja permeabilidad) resiste aceptablemente soluciones ligeramente ácidas.
- Deben evitarse la inmersión del hormigón en estas soluciones y de no ser posible, minimizar el tiempo de contacto.
- Ningún hormigón de cemento portland, independientemente de su composición, resistirá por largo tiempo un ataque ácido fuerte (PH<4.5).

4.7.3 Medidas preventivas para disminuir o evitar la acción corrosiva sobre el hormigón

a) Diseño adecuado de la estructura⁵⁴:

- Evitar el uso de secciones delgadas
- Utilizar secciones con formas redondeadas eliminar, en lo posible, las aristas
- Minimizar las áreas de contacto y las zonas de turbulencia

b) Fabricar hormigones compactos (de baja porosidad y permeabilidad), haciendo uso de todas las recomendaciones que brinda la tecnología del hormigón³³:

- Resistencia a compresión mínima ($f_c > 21.0$ MP)
- Relaciones agua / cemento bajas (en caso de ataque fuerte, $a/c < 0.40$)
- Penetración de agua según IRAM 1554 < 50 mm
- Agregados apropiados y con granulometría adecuada (en los casos de ataque por ácido sulfúrico puede ser conveniente utilizar agregados calizos)
- Contenidos apropiados de cemento (en general > 350 kg./m³)
- Es recomendable la utilización de aditivos fluidificantes superfluidificantes
- Es recomendable la utilización de aditivos incorporadores de aire
- Utilizar el mínimo asentamiento compatible con una buena colocación del hormigón (< 15 cm)

c) Emplear cementos idóneos (de modo de lograr pastas hidratadas de bajo contenido de CH)³³

- Cementos con adiciones minerales activas (AMA) de buena actividad puzolánica, que consuman el CH producido durante la hidratación de los silicatos
- En los casos de ataque por ácido sulfúrico puede ser conveniente emplear adiciones minerales de naturaleza carbónica (cementos con filler calcáreo)
- Cementos de baja relación SC_3/SC_2

d) Someter al hormigón a un curado adecuado (reducción de la porosidad y permeabilidad) antes de que entre en contacto con las aguas puras¹⁴

e) Fundamentalmente en el caso de que el ataque sea fuerte, se debe proteger a la estructura con una membrana, película o material impermeable, evitando el contacto del hormigón con la solución agresiva³⁰

f) En determinadas circunstancias, es posible recurrir al tratamiento de la solución agresiva para disminuir su poder disolvente o su acidez³¹.

5. APARATOS Y MÉTODOS PARA LA OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA DEL CONCRETO A NIVEL MICRO

5.1 Realizar una observación microscópica de las muestras y analizar las características del concreto.

- Análisis por medio de macroscopía y microscopio petrográfico.
- Tipo de agregado: Grueso y fino
- Aglomerante
- Vacíos (vesículas)
- Características de los agregados

5.2 Método de prueba normal para la determinación microscópica de parámetros de aire nulo para concretos endurecidos, norma ASTM C-457-98. (Método normal para la determinación microscópica de los parámetros de vacíos en concretos endurecidos)

5.2.1 Método por línea transversal

a) Procedimiento

Consiste en la determinación de la composición volumétrica del hormigón sumando el recorrido cruzado por un componente dado a lo largo de una serie de líneas regularmente espaciadas en uno o mas planos que cortan la muestra.

Los datos recabados son la longitud total que cruza (T_t), La longitud que recorre el aire anulo (T_a), la longitud que recorre a través de la pasta (T_p), y el número de aire nulo que es cortado por el recorrido de la línea (N). Éstos datos se usan para calcular el volumen aéreo y varios parámetros del sistema aire-nulo. Si sólo el volumen aéreo se desea, sólo T_a y no hay necesidad de que el T_t se determine.

b) Cálculo

Basado en el contenido total de aire en el hormigón:

Los datos consistirán de:

Donde:

N = número total de vacíos aéreos que corta,

R_i = número de rotaciones de los tornillos de primacía respectivos, y

P_i = diapasón del tornillo correspondiente que lleva.

T_t = longitud total que recorre = sumatoria de $P_i * R_i$

T_a = longitud que recorre a través del aire = $P_a * R_a$

T_p = longitud que recorre a través de la pasta = $P_p * R_p$

Contenido de aire (A), en porcentaje:

$$A = \frac{T_a * 100}{T_t}$$

Contenido de pasta (p), en %:

$$p = (T_p * 100) / T_t$$

Proporción pasta / aire (p/A):

$$p/A = T_p/T_a$$

5.2.2 El método punto conteo modificado

a) Procedimiento

Consiste en la determinación de la composición volumétrica del hormigón por la observación de la frecuencia con que las áreas de un componente dado coinciden con un sistema de la reja regular a que detiene a lo largo de se hace habilitar la determinación de la composición. Estos puntos pueden estar en uno o mas planos que cortan la muestra. Los datos recogidos son la distancia lineal entre las paradas a lo largo del recorrido (d_i), el número total de paradas (St), el número de paradas en el aire nulo (Sa), las paradas en la pasta (Sp), y el numero de aire anulo (N), que corta la línea de recorrido por encima de los datos del componente que se recogen. De estos datos el volumen aéreo y los parámetros del sistema aire-nulo son calculados. Si sólo el volumen aéreo se desea, sólo calcular Sa y no hay necesidad de que St se determine.

b) Cálculo

Cuando los cálculos son basados en la proporción de la pasta-aire, la longitud mínima de la barra y el número mínimo de puntos:

donde:

Sa = es el número de paradas al punto índice que se sobrepone en una sección de aire nulo,

Basados en datos recabados de una muestra de hormigón por medio de la observación microscópica; los datos consistirán de:

N = número total de vacíos

St = número total de paradas,

Sa = el número de paradas entre vacíos,

Sp = número de paradas en la pasta, y

Contenido de aire (A):

$$A = Sa \cdot 100 / St$$

La pasta contenida (p) in %:

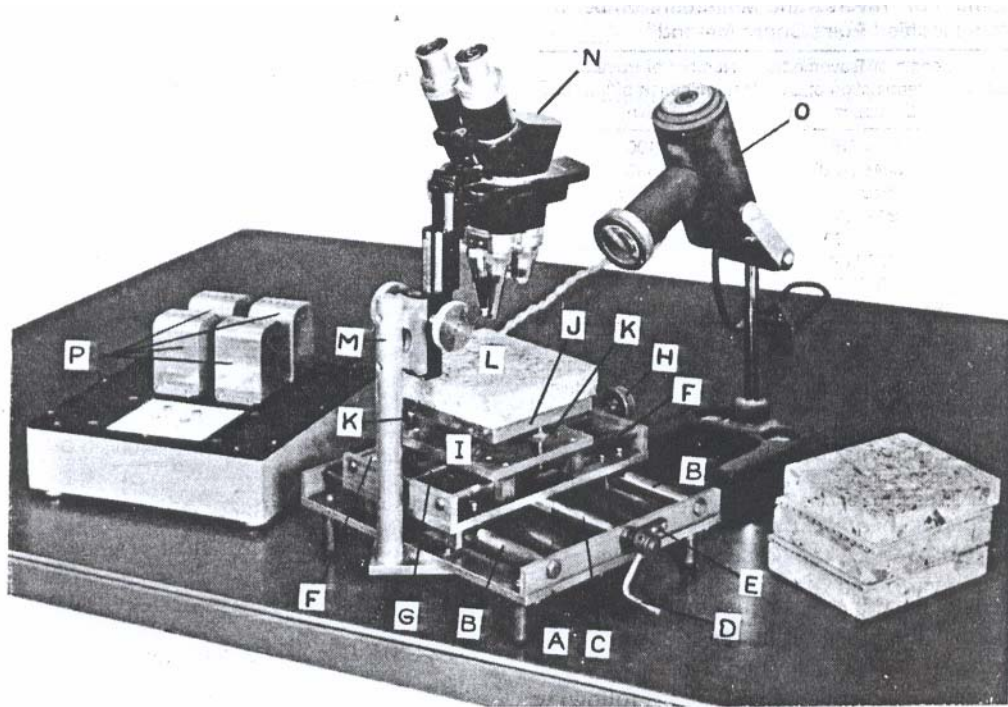
$$P = (Sp \cdot 100) / St$$

Proporción de pasta – aire (P/A):

$$(p/A) = (Sp/Sa)$$

5.3 Aparatos para la medida de especímenes

Figura 47. Microscopio *Point - count*, dispositivo que reúne los requisitos para cualquiera de los dos métodos utilizar



A = Plato bajo apoyo en las piernas.

B = Frente y atrás pone barandilla soporte de la fase entera.

C = Mas bajo tornillo de primacia.

D = Por mano operado por el cigüeñal para el *tuning* bajo el tornillo de primacia.

E = Deteniendo el dispositivo por indicar el punto-cuenta posiciona en la línea transversal.

F = Barras Izquierdas y correctas por apoyar la fase superior.

G = Tornillo del alimento cruzado para el movimiento lateral de fase superior.

H = Aperador manual del bulto moleteado para el *tuning*, tornillo del alimento cruzado.

I = Fase superior.

J = Plato de apoyo para espécimen concreto .

K = Tornillos para la superficie niveladora de espécimen concreto.

L = Especimen concreto.

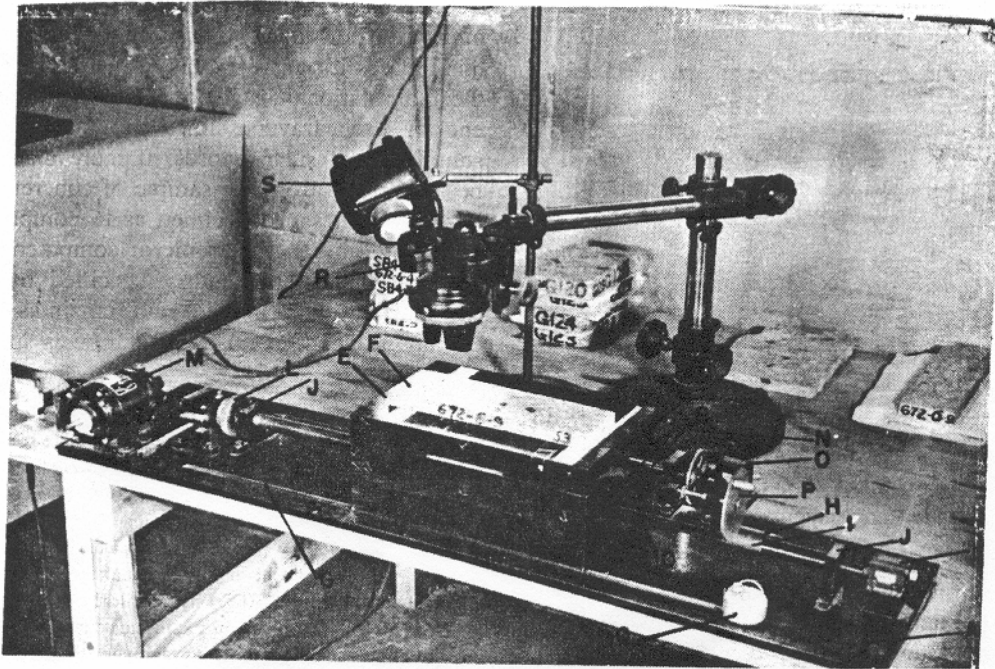
M = Apoyo para el microscopio.

N = Estereoscopio del microscopio.

O = Lámpara del microscopio

P= Contadores para grabar el número de puntos sobrepuestos en las secciones de aire nulo, pasta de cemento, y número de secciones aire-nulas para interceptar línea transversal.

Figura 48. Microscopio *Linear – Traverse*, dispositivo que reúne los requisitos para cualquiera de los dos métodos a utilizar



Partes del aparato

A = Plato bajo.

B = Frente y atrás pone barandilla del soporte medio del plato C

C = Medio plato.

D = Frente superior y atrás barras que llevan la fase E.

E = Fase

F = Espécimen concreto

G = Ranura del frente rectangular en el plato bajo.

H = En forma de V atrás de la ranura en el plato bajo.

I = Tornillo de primacía principal.

J = Dos bloques de la presión para el tornillo de primacía principal.

K = Contador de la revolución en el tornillo de primacía principal.

L = Rueda moleteada operada manualmente.

M = Motor eléctrico por manejar el tornillo de primacía principal.

N = Tornillo de primacía superior. .

O = Contador de la revolución para el tornillo de primacía superior.

P = Mano-manejado de la rueda para mover la fase.

Q = *Ratchet* para contar el número de aire nulo encontrado.

R = Estereoscopio del microscopio.

S = Lámpara del microscopio

6. EXPERIMENTACIÓN DE MUESTRAS CON LOS EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS ESTABLECIDOS

Preparación de las muestras, proporcionas por la Empresa Mixto Lixto, con el objeto de obtener el tipo de agregados, los parámetros de contenido de vacíos (poros) y las características microestructurales mas importantes para cada muestra de acuerdo a la información recabada de los cuadros del anexo 1 y los métodos utilizados para el análisis de los parámetros de vacíos, de las normas ASTM C-457-98 (Método normal para la determinación microscópica de los parámetros de vacíos en concretos endurecidos y ASTM C-856 (Examen para el análisis petrográfico del concreto endurecido respectivamente.

Dimensiones de las muestras

- Alto = 30 cm
- Diámetro = 15 cm
- Forma cilíndrica
- Tipo de construcción a utilizarse losas

En la cortadora de diamante se procedió a elaborar las muestras con las siguientes características

Forma rectangular

Largo 7 centímetros

Ancho 2.5 centímetros

Espesor 5 milímetros

Luego se inicio el desgaste de una de las caras de cada muestras con los abrasivos respectivos (400, 600 y 1000) hasta obtener un liso mate.

Terminadas las muestras se procedió a observar cada una de las muestras al microscopio: para ello se procedió a instalar cada muestra en el microscopio, utilizando las graduaciones y girando los tornillos respectivos, con el objeto de hacer las mejores observaciones y así realizar el mejor análisis posible.

En el siguiente inciso se determina las características para cada muestra de acuerdo a los parámetros establecidos de cada norma utilizada para este trabajo. (Ver inciso 6.1)

6.1 Análisis y características generales de las muestras de acuerdo a las observaciones microscópicas

6.1.1 Muestra 1

El examen de la muestra en microscopia se hace de acuerdo a las recomendaciones, listadas en el cuadro 1, del anexo 1.

- Agregado grueso:
Dimensión máxima: 19 mm. (0.748 pulgs.).
Tipo de agregado triturado, homogéneo.
Tipo litológico: Rocas carbonatadas principalmente calizas, presentan una coloración de gris claro a canela.

El agregado grueso constituye aproximadamente el 40% del total del concreto.

Textura: el agregado tiene una forma de sub-angulosa a angulosa, con una distribución caótica y alto grado de empaquetamiento. El agregado presenta 3 diferentes tamaños, por lo cual se considera que tiene buena clasificación de granos y no existe paralelismo en las partículas alargadas respecto a la dirección de colocación del concreto.

- Agregado fino:

Tipo: Arena natural, la cual se presenta en estado homogéneo.

Textura: Los agregados de arena tienen forma redondeada debido al transporte que ha sufrido, presentan una distribución caótica, con tamaños de partículas menores a 2 mm. Y sin orientación preferencial.

- Aglomerante:

El aglomerante presenta un color gris, distribuido uniformemente.

- Vacíos (vesículas)

Los vacíos se presentan de forma “esférica y no esférica” y representan un porcentaje mayor al 3%, no existe diferencia de color entre vació y mortero. Las vesículas no se encuentran rellenas de ningún material. Los vacíos se encuentran muchas veces en el borde del agregado grueso.

- Condición

El concreto produce un sonido seco al ser golpeado, no es posible quebrarlo con los dedos, la distribución de los agregados es caótica. En los especímenes no se observan fisuras o depósitos en superficies, los vacíos están secos y no presentan aureolas alrededor de los agregados.

6.1.1.1 Descripción de la muestra en microscopia

Se realiza el examen de la muestra 1, un estereomicroscopio y un microscopio petrográfico.

a) Examen con estereomicroscopio:

El estereomicroscopio utilizado posee una escala de aumento que va desde 10X a 40X.

- Agregado grueso

las observaciones se hacen con aumentos de 16X, 25X y 40X.

El agregado grueso esta compuesto por rocas carbonatadas principalmente calizas con algunos pocos fragmentos de rocas volcánicas. Las calizas están formadas por micro-cristales de calcita, por lo que se podría clasificar como una caliza micritica, la composición química de la calcita es CaCO_3 (carbonato de calcio); no se descarta la posibilidad de la presencia de magnesio por lo que se podría tener una caliza dolomítica. Por el grado de cristalización que se presentan los granos de calcita se puede inferir que ha sido afectada por metamorfismo.

- Agregado fino

El agregado fino está compuesto por fragmentos de rocas volcánicas de composición andesítica y minerales de cuarzo, hornblenda y micas. Las proporciones de los fragmentos, en la sección observada, las siguientes: Rocas volcánicas 30%, cuarzo 50%, micas 10% y 10% de hornblendas.

- **Aglomerante**
El aglomerante presenta un color gris claro y se encuentra perfectamente adherido a los agregados, no se presentan fracturas sobre la superficie cortada.

- **Vacíos (vesículas)**
En la muestra observada se presentan pocos vacíos (esféricos y no esféricos) los cuales tienen pequeñas dimensiones. En los vacíos se observa un color similar al del aglomerante.

- b) **Examen con microscopio petrográfico.**
Se realizará un examen de sección pulida del cilindro de concreto, utilizando un microscopio petrográfico, que posee cuatro aumentos; 4X, 10X, 20X, 40X. Las secciones fueron elaboradas de acuerdo a la norma C-457-98 (Método normal para la determinación microscópica de los parámetros de vacíos en concretos endurecidos) y se hicieron con la colaboración del Departamento de Investigaciones Mineras del Ministerio de Energía y Minas. El análisis se base en las recomendaciones de la norma ASTM C-856 (Examen petrográfico para concreto endurecido) resumidas en el tabla 4, del anexo .

- **Características de los agregados:**
Los agregados gruesos consisten de rocas calizas recristalizadas, los minerales presentes son principalmente de calcita, presentan una coloración gris claro a blanco. La calcita se distingue por presentar cristales paralelos y alta birrefringencia.

Se observa cierto grado de recristalización en la calcita, causado por metamorfismo.

La reacción con ácido clorhídrico (HCL) es débil, esto puede ser por la recristalización o por alguna cantidad del magnesio (en mineral dolomita) no observable.

Los agregados finos están constituidos por fragmentos de andesitas, minerales de hornblenda, cuarzo, piratas y micas (biotitas y muscovitas). En la sección observada sobresalen, por su tamaño (entre 4 y 5 mm) , las andesitas.

La pasta de cemento (aglomerante) observada con un microscopio petrográfico (en luz reflejada) presenta un color gris claro; con nicols cruzados el color de la pasta se torna gris oscuro. No se observan reacciones de álcali-carbónicas.

La pasta se encuentra perfectamente adherida a los agregados y se observan cristales de hidróxido de calcio.

6.1.2 Muestra 2

El examen de la muestra en macroscopia se hace de acuerdo a las recomendaciones, listadas en el cuadro 1, del anexo 1. en la figura se presenta la distribución de los agregados.

- Agregado grueso:

Dimensión máxima: 20 mm. (0.787 pulgs).

Tipo de agregado triturado. El agregado es homogéneo.

Tipo litológico: Tocas volcánicas, principalmente de composición andesítica, de color café oscuro a negro, algunas de ellas presentan vesículas.

El agregado grueso constituye aproximadamente el 30% del total del concreto.

- Textura: El agregado tiene forma que va de angulosa a muy angulosa, con una distribución caótica y alto grado de empaquetamiento. Se observa que el agregado presenta 2 diferentes tamaños de granos, adicionalmente se observa que existe paralelismo de algunas partículas alargadas respecto a la dirección de colocación del concreto.
- Agregado fino:
Tipo: Arena natural, la cual se presenta en estado homogéneo.
Trama: las arenas tienen forma redondeada (que va de acuerdo a su génesis), presentan una distribución caótica, con tamaños de partículas menores a 2 mm. y sin orientación preferencial.
- Aglomerante.
El aglomerante presenta un color gris, distribuido uniformemente, no se observan manifestaciones de deterioro en el concreto
- Vacíos (vesículas).
Los vacíos se presentan de forma esférica y no esférica en menos del 3% no existe diferencia de color entre vació y mortero. Las vesículas no se encuentran rellena de ningún material. La forma y distribución de los vacíos es totalmente irregular.

- Condición:
El concreto produce un sonido seco al ser golpeado, no es posible quebrarlo con los dedos, la distribución de los agregados es caótica. En los especímenes no se tienen fisuras o depósitos en superficies, los vacíos están secos, no se presentan aureolas alrededor de los agregados, ni depositaciones.

6.1.2.1 Descripción de la muestra en microscopia

- Se realiza el examen de la muestra 1, un estereomicroscopio y un microscopio petrográfico.
- a. Examen con estereomicroscopio.
El estereomicroscopio posee una escala de aumentos que va desde 10X a 40X.

 - Agregado grueso.
Las observaciones se harán con un aumento de 16X.
El agregado grueso está compuesto por rocas volcánicas, tales como: andesitas, de textura porfírica, con algunos fenocristales de feldespato (plagioclasa); el otro tipo de rocas presentes se clasifican como brechas volcánicas.
Las proporciones de andesitas y brechas volcánicas son de 70% y 30%, respectivamente, en la sección observada.

 - Agregado fino:
Las observaciones se hacen con un aumento de 40X.

El agregado fino esta compuesto por minerales de cuarzo, hornblenda y micas, de las cuales el cuarzo constituye un 60%, las hornblendas un 30% y las micas (biotitas y muscovitas) un 10%; estas proporciones fueron estimadas en una parte del espécimen en el que abundaba el agregado fino.

- Aglomerante.

El color que presenta es gris oscuro, no se observa grietas sobre la superficie cortada y el aglomerante se encuentra perfectamente adherido a los agregados.

- Vacíos (vesículas).

Los vacíos presentes en su mayoría son esféricos, su coloración similar a la del aglomerante y son de pequeñas dimensiones.

b. Examen con Microscopio Petrográfico.

Se realizará un examen de sección pulida a la muestra del cilindro de concreto, utilizando un microscopio petrográfico, que posee cuatro aumentos, 4X, 10X, 20X, 40X,. Las secciones fueron elaboradas de acuerdo a la norma C-457-98, y se hicieron con la colaboración del Departamento de Investigaciones Mineras del Ministerio de Energía y Minas. El análisis se basa en las recomendaciones de la norma ASTM C-856 resumidas en el tabla 4 , del anexo.

- Características de los agregados:

Los agregados gruesos consisten en rocas volcánicas.

En la sección observada los fragmentos de andesitas son de textura porfirítica, teniéndose una matriz compuesta por micro-cristales de piroxenos, anfíboles y feldespatos.

El agregado fino está compuesto de fragmentos de cuarzo, hornblenda y micas. En la sección observada el cuarzo y hornblenda constituyen los dos tipos de minerales de mayor abundancia.

La pasta de cemento (aglomerante) observada en el microscopio petrográfico (con luz natural) es de color gris claro y con nícoles cruzados presentan un color gris oscuro.

En las secciones observadas la adherencia entre el agregado grueso y el aglomerante es perfecta.

6.2 Observación microscópica para la obtención de datos para calcular los parámetros de los métodos de línea transversal y punto conteo modificado para muestra 1 y muestra 2

6.2.1 Método línea transversal

N = número total de vacíos,

R_i = número de rotaciones de los tornillos de primacía respectivos,

P_i = diapasón del tornillo correspondiente que lleva.

T_t = longitud total que recorre = sumatoria de $P_i * R_i$

T_a = longitud que recorre a través del vacío = $P_a * R_a$

T_p = longitud que recorre a través de la pasta = $P_p * R_p$

Contenido de vacíos (A), en porcentaje:

$$A = \frac{T_a * 100}{T_t}$$

Contenido de Pasta (p), en %:

$$p = (T_p * 100) / T_t$$

Proporción pasta / aire (p/A):

$$p/A = T_p/T_a$$

6.2.2 Método punto conteo modificado

De acuerdo con la observación de microscopio y mandos del mismo.

Datos:

N = número total de vacíos

St = número total de paradas,

Sa = el número de paradas entre vacíos,

Sp = número de paradas en la pasta,

Formulas:

Contenido de vacíos (A) %:

$$A = S_a * 100 / S_t$$

La pasta contenida (p) in %:

$$P = (S_p * 100) / S_t$$

Proporción de pasta – vacíos (P/A):

$$(p/A) = (S_p/S_a)$$

6.2.2.1 Muestra 1 concreto con agregado caliza, (ver figura 49)

Cálculo

(datos recabados de la observación microscópica)

- **a) Método línea transversal**

Datos:

$$N = 9$$

$$R_i = 10, 16, 18, 4$$

$$P_i = 10, 20, 22, 22$$

$$T_t = 804.60$$

$$T_a = 30$$

$$T_p = 70$$

Contenido de vacíos: (A)

$$A = 3.73 \%$$

Contenido de pasta: (p)

$$p = 8.70\%$$

Relación pasta – vació: (p/A)

$$p/A = 70/30$$

b) Método punto conteo modificado:

Datos:

$$N = 9$$

$$Sp = 70 \text{ mm}$$

$$Pa = 30 \text{ mm}$$

$$St = 848.50 \text{ mm}$$

Contenido de vacíos: (A)

$$A = 3.54 \%$$

Contenido de pasta: (p)

$$p = 8.25\%$$

Relación pasta – vació: (p/A)

$$p/A = 70/30$$

**6.2.2.2 Muestra 2 concreto con agregado volcánico
(ver figura 50)**

Cálculo

- a) **Método línea transversal:**
(datos recabados de la observación microscópica)

- **Muestra 2 (volcánica)**

Datos:

$$N = 11$$

$$R_i = 15, 12, 5$$

$$P_i = 25, 30, 25,$$

$$T_t = 860.83$$

$$T_a = 40$$

$$T_p = 60$$

Contenido de vacíos: (A)

$$A = 4.65 \%$$

Contenido de pasta: (p)

$$p = 6.97\%$$

Relación pasta – vació: (p/A)

$$p/A = 60/40$$

b) Método punto conteo modificado:

Datos:

$$N = 11$$

$$S_p = 60 \text{ mm}$$

$$S_a = 40 \text{ mm}$$

$$S_t = 842.70 \text{ mm}$$

Contenido de vacíos: (A)

$$A = 4.75 \%$$

Contenido de pasta: (p)

$$p = 7.12\%$$

Relación pasta – vació: (p/A)

$$p/A = 60/40$$

A continuación se presenta detalles de las muestras observadas:

Figura 49. (a) Fotografía sección pulida y (b) esquema vista en microscopio de la muestra 1

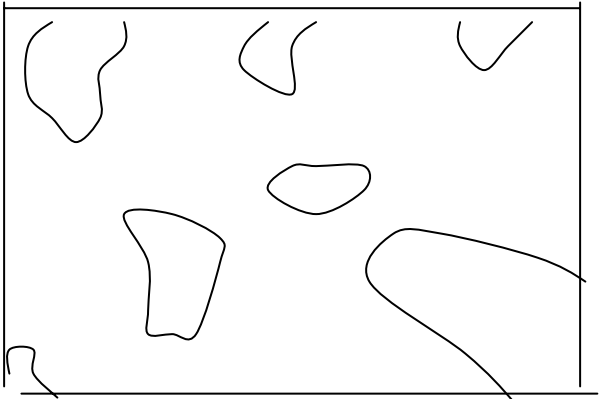
a)



b)

Dirección de colocación

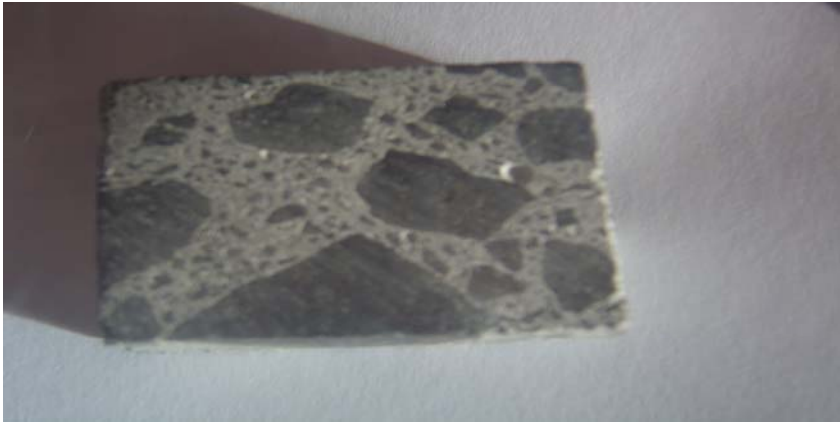
Agregado grueso



del concreto

Matriz cemento – agregado fino

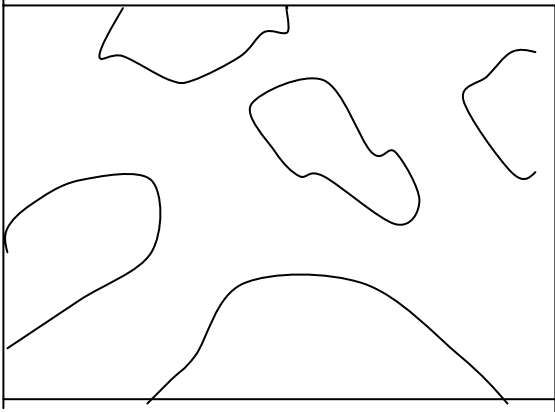
Figura 50. (a) Fotografía de la sección pulida y (b) esquema visto en microscopio



b)

Dirección de colocación
del concreto

Agregado grueso



Matriz cemento - agregado fino

7. RESULTADOS

A continuación se presentan en forma resumida los resultados del Examen Petrográfico del Concreto Endurecido (EPCE) en el cual resaltan las características principales de los especímenes analizados (muestra 1 y muestra 2)

Figura 51. Características de las observaciones al microscopio

Espécimen Analizado	Características Generales			Observaciones
	Agregado Grueso	Agregado Fino	Aglomerante	
Muestra 1	-Triturado -Homogéneo -Rocas Carbonatadas (Calizas recristalizadas de color gris claro a canela con microcristales de calcita.	-Natural -Homogéneo -Fragmentos de rocas volcánicas (andesitas) minerales de cuarzo, hornblenda y micas.	-Color gris-claro -Distribución uniforme -Existe una Fractura - Perfectamente adherido a los agregados.	-No se observan reacciones álcali-carbónicas -Podrían existir dolomitas (carbonatos dobles de calcio y magnesio).
Muestra 2	-Natural y triturado -Heterogéneo -Rocas	-Natural -Homogéneo -Fragmentos de Rocas	-Color gris-claro (luz natural) -Distribución	-No se observa reacción álcali-sílice

	volcánicas (Andesitas de color café oscuro a negro, con microcristales de piroxenos, anfíboles y feldespatos; otras rocas presentes son obsidiana y pómez).	volcánicas -(Andesitas) minerales de cuarzo, hornblenda, micas y piratas.	uniforme. -No existen fracturas. - Perfectamente adherido a los agregados	
--	--	--	---	--

Presentan los resultados de los métodos analizados para la obtención de los parámetros de vacíos, para concretos endurecidos y realizando una comparación de ellos.

Figura 52. Datos de los parámetros de vacíos (poros)

MÉTODOS	LÍNEA TRANSVERSAL			PUNTO CONTEO MODIFICADO		
	contenido de vació (A)%	Contenido de pasta (p)%	Relación pasta-vació p/A	contenido de vació (A)%	Contenido de pasta (p)%	Relación pasta-vació p/A
Muestra 1	3.73	8.7	70/30	3.54	8.25	70/30
Muestra 2	4.65	6.97	60/40	4.75	7.12	60/40

Según la norma ASTM C-457-98 (metodo de prueba normal para la determinación microscópica de vacíos en un concreto endurecido), los parámetros permisibles son:

Contenido de vacíos % < 7.5%

Contenido de pasta % rango (4 –10)

Relación pasta vacío según criterio del observador.

CONCLUSIONES

- 1 El Examen Petrográfico, es útil para la determinación de la calidad del concreto, esto debido a que se hace un análisis minucioso de la composición petrográfica y mineralogía de los agregados y de las reacciones que puedan dar entre agregados el aglomerante, a través del estereomicroscopio y el microscopio petrográfico.
- 2 El agregado fino usado en los dos casos de estudio es de tipo natural, formado por fragmentos líticos de rocas andesíticas.
- 3 Debe tenerse especial cuidado con rocas que contengan magnesio por los efectos nocivos que produce éste en el concreto, esto para la construcción de cualquier edificación grande.
- 4 En las muestras analizadas no presentan reacciones de álcali – sílice ni álcali – carbonato, respectivamente.
- 5 Para evitar la acción corrosiva sobre concretos es necesario fabricar concretos compactos (de baja porosidad y permeabilidad), haciendo uso de todas las recomendaciones que brinda la tecnología del concreto.
- 6 La muestra 2 (agregado volcánico), al agregarle el ácido clorhídrico diluido al 10%, (HCL) este se observó que el agregado sufrió picaduras.

- 7 La muestra 1 (caliza), de los análisis cualitativos, cuantitativos; es lo mejor para la fabricación de concretos de buena calidad y uso en construcciones grandes.
- 8 El uso de agregado grueso volcánico en la muestra 2, por su alto contenido de sílice, su porosidad deterioran el concreto, produciendo fisuras y separación entre el agregado grueso y la pasta de cemento no observables llamada Interfaz.
- 9 Los parámetros permisibles según la norma ASTM C-457-98 (método de prueba normal para la determinación microscópica de vacíos en un concreto endurecido), para el contenido de vacíos es < que 7.5%, contenido de pasta rango (4 –10)%.
- 10 De la comparación que se realiza en relación a los parámetros según la norma ASTM C-457-98 (método de prueba normal para la determinación microscópica de vacíos en un concreto endurecido), se sabe que la muestra 1 por menor contenido de vacíos es el concreto de mejor calidad.
- 11 De las observaciones realizadas se observa una fisura en la muestra 1 que se pudo haber producido por falla mecánica, durante la elaboración de las muestras.

RECOMENDACIONES

- 1 Por su especial historia geológica nuestro país es muy rico en materiales, ya que posee los tres grupos de rocas (ígneas, metamórficas y sedimentarias), una gran variedad de composiciones y edades; de donde proviene el problema en las construcciones civiles, ya que tales materiales son utilizados indiscriminadamente en la elaboración del concreto, y algunas veces los materiales están contaminados o contienen componentes indeseables que influyen en la vida del concreto; por esto se hace necesaria la aplicación de una norma en la que se evalúe el material que se pretenda utilizar y así evitar reacciones entre los componentes del concreto.
- 2 Es de suma importancia, en el Examen Petrográfico del Concreto Endurecido (EPCE) para secciones pulidas, contar con la asesoría de un petrografo experimentado, para poder así hacer uso eficiente del estereomicroscopio y microscopio petrográfico, así también en la identificación de las rocas y minerales.
- 3 Minimizar la reactividad álcali-sílice y álcali-carbonato: Evitando el empleo de rocas reactivas por medio de extracción selectiva, dilución con agregados no reactivos o el uso de un tamaño mínimo, también la aplicación de cemento con bajo contenido de álcali.

- 4 Cuando se considere que el agregado esta constituido por rocas dolomitas, es recomendable realizar un análisis químico para determinar el porcentaje de magnesio.
- 5 Minimizar el contenido de vacíos en el concreto, utilizando incorporadores de aire.
- 6 Fabricar concretos con agregados calizos ya que estos son menos reactivos y sus características hacen que su manejabilidad con la pasta de cemento sea de mejor calidad y cumpla con las expectativas de obtener excelentes construcciones.
- 7 Se insta a empresas dedicadas a construcciones civiles darle mayor seguimiento a este tipo de estudios

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

¹ E. Hornbogen, **On the Microstructure of Alloys**, Acta metal., 32, 615-27 (1984).

² H. F. W. Taylor, **Chemistry of Cement Hydration**; pp. 85-110 in proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. I. Finep, Brazil 1986.

³ H. F. W. Taylor, **Proposed Structure for C-S-H Gel**, J. Am. Ceram. Soc. 69 [6] 464-67 (1986).

⁴ S. Diamond, **Cement paste Microstructure-An Overview at Several Levels**, pp. 2-30 in Hydraulic Cement Pastes: Their Structure and Properties. Cement & Concrete Association, Slough, U.K. 1976.

⁵ H. M. Jennings, **The Developing of Microstructure in Portland Cement**; pp 349-96 in Advances in Cement; Technology. Edited by S. N. Ghosh. Pergamon, New York, 1983.

⁶ K. L. Scrivener, **The Development of Microstructure during the Hydration of Portland Cement**; Ph. D. Thesis, University of London, 1984

⁷ D. H. Campbell **Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker**. Portland Cement Association, Skokie, IL, 1986.

⁸ G. R. Long. **The Use and Application of Optical Microscopy in Portland Cement Clinker Research**, pp 39-50 in Characterization and Performance Prediction of Cement and Concrete. Edited by J. F. Young. Engineering foundation, New York 1982.

⁹ E. Fundal, **Optical Microscopy of Cement Clinkers and Raw Mixes**, FLS Review No. 25. F. L. Smidth, Copenhagen.

¹⁰ N. Thaulow, A. Damgaard Jensen, S. Chatterji P. Chirstensen, and H. Gudmundsson, **Estimation of the Compressive Strength of Concrete Samples by Means of Fluorescence Microscopy**, Nordisk Betong, 2-4, 51-52 (1982).

¹¹ H. N. Walker and B. F. Marshall, **Methods and Equipment Used in Preparing and Examining Fluorescent Ultrathin Section of Portland Cement Concrete**, Cem. Concr. Aggs., CCAGDP, 1,3-9 (1989).

¹² D. D. Double, **Some Studies of the Hydration of Portland Cement Using High Voltage (1 Mev) Electron Microscopy**, Mater. Sci. Eng. 12, 29-34 (1973).

¹³ D. D. Double, A. Hellawell and S. J. Perry, **The Hydration of Portland Cement**, Proc. R. Soc. (London), Sect. A., 359, 435-51 (1978).

¹⁴ H. M. Jennings and P. L. Pratt, **On the Reactions Leading to Calcium Silicate Hydrate, Calcium Hydroxide and Ettringite during the Hydration of Cement** ;, pp. II. 141-II. 146 in Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, vol. II. Editions Septima, Paris, (1980).

¹⁵ K. L. Srivener and P. L. Pratt, **Characterisation of Portland Cement Hydration by Electron Optical Techniques**; pp 351-68 in Electron Microscopy of Materials. Edited by W. Krakow, D. A. Smith, and L. W. Hobbs. Materials Research Society Symposium proceedings, Vol. 31, 1983.

¹⁶ T. N. Tiegs., **Investigation of Ion-Thinned Tricalcium Silicate Pastes by Transmission electron Microscopy**; M. Sc. Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1975.

¹⁷ R. Javels, J. C. Maxo, and J. P. Ollivier, **Realisation de lames Ultramine de mortier pour observation directe au microscope electronique par transmission**, Cem. Concr. Res., 4, 167-76 (1974).

¹⁸ R. Javels, J. C. Maso, J. P. Ollivier, and B. Thenoz, **Observation directe au microscope electronique par transmission de la liason pate de ciment-granulat dans des mortier de calcite et de quartz**, Cem. Concr. Res., 5, 285-94 (1975).

¹⁹ B. J. Dalgleish, P. L. Pratt, and R. I. Moss, **Preparation techniques and the Microscopical examination of Prtland Cement Paste and C₃S**, Cem. Concr. Res., 10, 665-75 (1980).

²⁰ B. J. Dalgleish and K. Ibe., **Thin foil Studies of Hydrated Portland Cement**, Cem. Concr. Res., 11, 729-39 (1981).

²¹ K. L. Scrivener and P. L. Pratt, **Backscattered Electron Images of Polished Cement Sections in the Scanning Electron Microscope**, pp. 145-55 in Proceedings of the 6th International Conference on the Microscopy of Cements, International Cement Microscopy association, (1984).

²² K. L. Scrivener, H. H. Patel, P. L. Pratt, and L. J. Parrott, **Analysis of Phases in Cement Paste Using Backscattered Electron Images**; pp. 67-76 in Microstructural Development during Hydration of cement. Edited by Leslie J. Struble and P. W. Brown. Materials Research Society Symposium, Vol. 85, 1987.

²³ R. H. Bogue, **Ind. Eng. Chem. Analyt. Edn.**, 1 [4] 192 (1929)

²⁴ L. Struble, **A. Review of Clinker analysis by QXRD**; pp. 31-37 in Characterization and Perfomance of Cement and Concrete. Engineering Foundation, New York, 1983.

²⁵ R. L. Berger. G. J. C. Frohnsdorff, P. H. Harris , and P. D. Johnson, **application of X-Ray Diffraction to Routine Mineralogy Analisis of Portland Cement**; pp. 234-53 in Structure of Portland Cement Paste and Concrete. Highways Research board SR90, 1966.

²⁶ W. A. Gutteridge, **Quantitative X-ray Powder Difraction in the Study of some Cementive Materials**; pp. 11-23 in Chemistry and Chemically Related

Properties of Cement. Edited by F. P. Glasser. Proceedings of the British Ceramic Society, Vol. 35, 1984.

²⁷ K. L. Scrivener, **The Microstructure of Anhydrous Cement and its Effect on Hydration**; pp. 39-46 in Microstructural Development during Hydration of Cement. Edited by Leslie J. Struble and P. W. Brown. Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 85, 1987.

²⁸ W. Gerhard and E. Nagele, **The Hydration of Cement Studies by Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS)**, Cem. Concr. Res., 13, 846-56 (1983).

²⁹ G. W. Groves, **Portland Cement Clinker Viewed by Transmission Electron Microscopy**, Cem. Concr. Res., 12, 619-25 (1982).

³⁰ K. L. Scrivener and P. L. Pratt, **Microstructural Studies of the Hydration of C₃A and C₄AF Independently and in Cement Paste**; pp. 207-20 in the Chemistry and Chemically Related Properties of Cement. Edited by F. P. Glasser. Proceedings of The British Ceramic Society, Vol. 35 1984.

³¹ D. Menetrier, I. Jawed, T. S. Sun, and J. Skalny, **ESCA and SEM Studies on Early C₃S Hydration**, Cem. Concr. Res., 9, 473-82 (1979).

³² B. J. Dalglish, P. L. Pratt, and E. Toulson, **Fractographic Studies of Early Hydration Products in Cement Past**, J. Master. Sci., 17 2199-2207 (1982).

³³ B. J. Dalglish, A. Ghose, H. M. Jennings, and P. L. Pratt, **The Correlation of Microstructures with Setting and Hardening in Cement Paste**; pp. 137-43 in International Conference on Concrete at Early Ages, Vol, 1, 1982.

³⁴ D. N. Hadley, **The Nature of the Paste-Aggregate Interface**; Ph.D. Thesis, School of Civil Engineering, Puerpude University, West Lafayette, IN, 1972.

³⁵ P. L. Pratt and A. Ghose, **Electron Microscope Studies of Portland Cement Microstructures During Setting and Hardening**, Phil. Trans. R. soc. (London), Sect. A. 310, 93-103 (1983).

³⁶ H. F. W. Taylor, **The Reactions of Cement Compounds with Water**; in Proceedings of the 10th International Symposium on the Reactivity of Solids, Dijon Elsevier, Amsterdam, 1984.

³⁷ K. L. Scrivener, Study of the Microstructure of Two Old Cement Pastes; pp. 389-93 in Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. II. Finep, Rio de Janeiro, Brazil, 1986.

³⁸ H. Funk, **Two Different ways of Hydration in the reaction of β - Ca_2SiO_4 with Water at 25 to 120°C**; pp. 291-95 in Proceedings of the 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, Vol. I. Washington, National Bureau of Standards Monograph 43, 1962.

³⁹ J. D. C. McConnell, **The Hydration of Larnite and Bredigite and the Properties of the Resulting Gelatinous Mineral Plomberite**, Mineral. Mag., 30, 672-80 (1955).

⁴⁰ H. F. W. Taylor and D. E. Newbury, **An Electron Microbe Study of a Mature Cement Paste**, Cem. Concr. Res., 14, 565-73 (1984).

⁴¹ K. L. Scrivener and H. U. Jense; unpublished work.

⁴² A. Ghose and P. L. Pratt, **Studies of the Hydration Reactions and Microstructure of Cement Fly Ash pastes**; pp. 82-91 in Proceedings of a Symposium on the Effects of Fly Ash in Cement and Concrete, Materials Research Society, Pittsburgh, 1981.

⁴³ Y. Halse, D. Goult, and P. L. Pratt, **Calorimetry and Microscopy of Fly Ash and Silica Fume Cement Blends**; pp. 403-17 in the Chemistry of

Chemically Related Properties of Cement. Edited by F. P. Glasser. British Ceramic Society, Stoke-on Trent, 1984.

⁴⁴ Y. Halse P. L. Pratt, J. A. Daziel, and W. A. Gutteridge, **Development of Microstructure and Other Properties in Fly Ash/OPC Systems**, Cem. Concr. Res., 14, 491-98 (1984).

⁴⁵ H. Tanaka, Y. Totani, and Y. Saito, **Structure of Hydrated Glassy Blast Furnace Slag in Concrete**; pp. 963-77 in Proceedings of the 1st Conference on Fly Ash, Silica Fume, slag, and Natural Pozzolans in Concrete, vol. 2. Montebello, 1983.

⁴⁶ A. M. Harrison, N. B. Winter, and H. F. W. Taylor, **An Examination of Some Pure and Composite Portland Cement Pastes using Scanning Electron Microscopy with X-ray Analytical Capability**; pp. 170-75 in Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. IV. Finep, Rio de Janeiro, Brazil, 1986.

⁴⁷ E. Dinsoyr, T. Mosberg, and J. Young, **Influence of Aggregates on the Strength and Elastic Modulus of High Strength Mortars Containing Microsilica**; pp. 211-18 in Very High Strength Based Cement-Based Materials. Edited by J. Francis Young. Materials Research Society, Pittsburg, 1985.

⁴⁸ M. Regourd, **Microstructure of High Strength Cement Based Systems**; pp. 3-17 in Very High Strength Cement-Based Materials. Edited by J. Francis Young. Materials Research Society, Pittsburg, 1985.

⁴⁹ K. L. Scrivener and A. Bentur, **Quantitative Characterization of the Transition Zone in High Strength Concretes**, Adv. Cem. Res., 1[4] 230-37 (1988).

⁵⁰ B. B. Mandelbrot, **the Fractal Geometry of Nature**. W. H. Freeman & Co., New York, 1983.

⁵¹ D. N. Winslow, The Fractal Nature of the Surface of Cement Pastes, Cem. Concr. Res. 15, 817-24 (1985).

⁵² L. Collis and R. A> Fox (eds.), **Aggregates: Sand, Gravel & Crushed Rock Aggregates for Construction Purposes**; Report of a Working Party of the Engineering Group of the Geological Society of London. The Geological Society, London, 1985.

⁵³ B. D. Barnes, S. Diamond, and W. L. Dolch, **Micromorphology of the Interfacial Zone Around Aggregates in Portland Cement Mortar**, J. Am. Ceram. Soc., 62 [1] 21-24 (1979).

⁵⁴ K. L. scrivener and P. L. Pratt, **A. Preliminary Study of the Microstructure of the Cement / Aggregates Bond in Mortars**; pp. 466-71 in Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. III. Finep, Rio de Janeiro, Brazil, 1986.

⁵⁵ J. Grandet and J. P. Ollivier, **Nouvelle Methode d'etude des interface ciments granulats**; pp. Vol. III. Editions Septima, Paris, 1980.

⁵⁶ J. P. Ollivier, **Contirbution a l'etudes de l'hydratation de la pate de ciment Portland au voisinage des granulats**, Thesis, L'Universite Paul Sabatier de Toulouse, France, 1981.

⁵⁷ J. Grandet and J. P. Ollivier, **Orientation des Hydrates au contac de granulats**, pp. VII. 63-68 in Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. II. Editions Septima , Paris, 1980.

⁵⁸ P. J. M. Monterio and P. K. Mehta, **Ettringite Formation on the Aggregate – Cement Interface**, Cem. Concr. Res. ., 15. 378-80 (1985).

⁵⁹ P. J. M. Monterio, J. C. Maso, and J. P. Ollivier, **The Aggregates – Mortar Interface**, Cem. Concr. Res., 15, 953-58 (1985).

⁶⁰ L. Struble and S. Mindess, **Morphology of the Cement – Aggregates Bond**, Int. J. Cem. Comp. Lightw. Concr., 5, 79-86 (1983).

⁶¹ J. Farrat, **Contribution mineralogique a l'etude de l'adherence entre le constituents hydrates des ciment et les materiaux enrobes**, Rev. Mater. Construct., No. 490-491-492 (1956).

⁶² B. D. Barnes, S. Diamond, and W. L. Dolch, **The Contact Zone Between Portland Cement paste and Glass 'Aggregate' Surfaces**, Cem. Concr. Res., 8, 233-43 (1978).

⁶³ P. J. M. Monterio and P. K. Mehta, **Interaction Between Carbonate Rock and Cement Paste**, Cem. Concr. Res., 16, 127-34 (1986)

⁶⁴ K. L. Scrivener and P. L. Patt, **The Characterisation and Quantification of Cement and Concrete Micorstructures**; pp. 61-68 in pore Structure and Materials properties, Vol. 1. Chapman & Hall, London, 1987.

⁶⁵ K. L. Scrivener and E. M. Gatner, **Microstructural Gradients in Cement Paste Around Aggregate in Particles**; pp. 77-86 in bonding In Cementious Composites, Edited by S. Mindess and S. P. Shah. Materials Research Society, Pittsburgh, 1988.

⁶⁶ K. L. Scrivener, A. K. Crumbie, and P. L. Pratt, **A study of the Interfacial Cementious Composites**. Edited by S. Mindess and S. P. Shah. Materials Research Society Symposium Proceedings 114, Pittsburgh, 1988.

⁶⁷ P. C. Kreijger, **The 'Skin' of Concrete: Research Needs**, Mag. Concr. Res., [140] 122-23 (1987).

⁶⁸ P. C. Kreijger, **The Skin of Concrete: Composition and Properties**, Mater. Construct., 17 [100] 275-83 (19840).

⁶⁹ L. J. Parrott, **Measurement and Modelling of Moisture, Microstructure and Properties in Drying Concrete**; pp. 135-42 in *Structure and Materials Properties*, Vol. 1. Chapman & Hall, London, 1987.

⁷⁰ I. J. Parrot, D. C. Killoh, and R. G. Patel, **Cement Hydration under partially Saturated Curing Conditions**, pp. 46-50 in *Proceedings of the 8th International Congress of the Chemistry on Cement*, Vol. III. Finep, Rio de Janeiro, Brazil, 1986.

⁷¹The w/c ratio of all the pastes illustrated is 0.5 unless otherwise stated.

BIBLIOGRAFÍA

- Cruz Barrillas, Sergio Augusto. Aplicación del método de análisis petrográfico del concreto endurecido. Tesis Ing. Civil. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1995
- Ibarra Guillermo, Marco Antonio. Consideraciones en el uso de modelos en microconcreto (propiedades y características). Tesis Ing. Civil. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1985
- Palacios Salinas, Heriberto. **Manual para el estudio microscopio de rocas sedimentarias**. Instituto Politécnico Nacional (México 1992)
- Robb, Louis A. **Diccionario para ingenieros español - inglés, inglés – español**. Vigésima Impresión. (México: s.e.1,981)
- Skalny, Jan P., **Materials science of concrete** 1. (Estados Unidos: s.e. 1989)
- Simons Robinson, Edwin. **Geología física básica**, Editorial Limusa S.A. de C.V. Balderas 95, Primer Piso, 06040 (Mexico s.e. 1,990)
- Wiley, John. **The science of concrete**, (Estados Unidos: s.e. 1957)
- Yardley, B. W. D., Mackenzie, W. S., and Guilford, C. **Atlas of**

Metamorphic Rocks and their Textures Copublished (United States s.e. 1,990)

ANEXO

**TABLAS GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DEL EXAMEN PETROGRÁFICO
DEL CONCRETO ENDURECIDO.**

**(LA PRESENTE INFORMACIÓN REPRESENTA UNA TRADUCCIÓN DE LA
NORMA DE LA SOCIEDAD AMERICANA PARA EL ENSAYO DE
MATERIALES ASTM C- 856)**

Tabla III. Examen visual del concreto

Agregado Grueso	Agregado Fino
<p>Composición: -Dimensión máxima en mm ó pulg. En el rango > d > -Tipo: 1. Grava (natural) 2. Piedrin (triturado) 3. Mezclado de 1 y 2. 4. Otros. 5. Mezclado de 1 + 2 ó + 4. Si el tipo 1, 2 ó 4 homogéneo o heterogéneo -Tipos litológicos agregado grueso más de 20, 30, 40 ó 50% del total -TEANA Forma Distribución Empaquetamiento Graduación (parejo, disparejo, exceso) o Deficiencia del tamaño o dimensión. Paralelismo a los lados del plano o el largo de los ejes de las secciones expuestas, normal a la dirección de colocación (empleo) y/o paralelo al encofrado y superficies acabadas.</p>	<p>Tipo: 1. Arena Natural 2. Arena elaborada (triturada) 3. Mezclado 4. Otros 5. Mezcla de 1 + 2 ó + 4 Si el tipo 1, 2, ó 4 homogéneo ó heterogéneo.</p> <p>Distribución Forma de partícula si es Gradación (graduación) permisible Orientación preferencial</p>

Aglomerante	Vacío	Artículos Encajados
<p>Color por comparación con: "diagrama del color de la rcca", Del Consejo Nacional de Investigación (1963).</p> <p>Distribución del color: 1. Jaspeado 2. Disparejo 3. Cambios gradules</p> <p>Distribución</p>	<p>¿Más del 3% del total, es predominantemente en vacíos esféricos? ¿es menos del 3% del total en vacíos no esféricos?</p> <p>Diferencias del color entre vacíos y Morteros.</p> <p>Huecos vacíos, llenos, alineados ó parcialmente llenos.</p> <p>Forma: Distribución Gradación (si es perceptible) Paralelismo del largo irregular del eje, Vacíos o capas de vacíos, unos con otros, Con los lados del plano ó el largo del eje o la mezcla gruesa</p>	<p>Tipo, tamaño, lugar; clases de metal, otros Artículos.</p> <p>Vacíos debajo de la horizontal o bajo el angulo de refuerzo.</p> <p>Limpio o corroído, son fisuras asociadas con los artículos encajados</p>

Condición:

¿El concreto produce un sonido seco, cuando se golpea ligeramente con un martillo, o da un sonido apagado (desafinado)? ¿Puede usted quebrarlo con los dedos o fisurado? ¿ como esta triturado?. Con núcleos u otros especímenes cortados, ¿Se rompió la mezcla con el barreno?. ¿Tiene Fisuras, o depositos en superficies?, ¿Están los vacíos inusualmente húmedos o hay áreas secas?, ¿Hay aureolas en los agregados?.

^aUna porción sustancial de agregado grueso tiene dimensiones máximas, medida en superficies quebradas o cortadas.

^b En secciones cortadas o taladradas estrechas y paralelas aparece una turbulencia local, como resultado del corte o el refuerzo estructural.

Secciones cortadas en el plano de la estratificación (normal a la dirección de la colocación del concreto), están a propósito para tener poca apariencia de orientación. Secciones normales quebradas a la colocación en el lugar convencional del concreto, pueden tener abundantes protuberancias de mezcla en el fondo de la pieza superior y casquillos abundantes en la cima de la pieza inferior.

Tabla IV. Esquema para el examen de concreto en secciones delgadas

AGREGADO FINO Y GRUESO	GRANOS DE CEMENTO RESIDUALES Y PRODUCTO DE HIDRATACIÓN
<p>Mineralogía, textura, estructura (variable u homogénea.</p> <p>Granulometría: En exceso o con deficiencia en el tamaño de las Arenas, será determinado después de un examen de series de secciones delgadas. El tamaño del grano y los límites internos naturales en el agregado. Clasificación de agregado fino y grueso, agregado natural o piedra triturada.</p> <p>Adherencia con aglutinante, grietas periferias dentro de los</p> <p>Granos del agregado, grietas internas, microfracturas generales, si se puede establecer que ellas existieron antes que el seccionamiento delgado. Reacciones álcali-carbónicas, si el agregado grueso es una o unas rocas de carbonato, observar si hay anillos completos o parciales disipados en hidróxido de calcio. En cierto modo, las rocas dolomíticas (roca caliza, carbonato doble natural de cal y magnesia) que han reaccionado algunas veces están rodeadas con pasta libre de hidróxido de calcio, a lo largo de la porción dolomítica, mientras que la pasta a lo largo de la porción caliza, se encuentra normal.</p> <p>Ver otros comentarios en columna y.</p> <p>Reacción de álcali-sílice.</p> <p>Tipo de partículas conocidos a la reacción (pedernal, novaculita, vidrio volcánico ácido cristocalita, trilicita, ópalo vidrio de botella). Si es cuarcita (roca silicia), vaca feo-gris metamorfoseada, arcilla, filita o cualquiera de los nombrados anteriormente. ¿Hay grietas internas dentro de la periferia del agregado?. ¿A sido gelatinizado el agregado de manera que a sido sacado durante el seccionado, dejando solamente una cáscara consolidada al mortero? (Este último fenómeno ocurre además en concreto con agregado de escoria por enfriamiento de aire, en donde indica reacción entre el cemento y la escoria), las grietas que parecen ser atención. Reduciéndose desde el centro hacia el frente del borde de la partícula, son además, evidencia de reacción álcali-silicea.</p>	<p>En concreto, de mas de dos años de edad y con curado normal los únicos granos de cemento restantes, son aquellos que fueron mas largos, los que podrían contener varios componentes o ser de alita o belite (substituidas por C₂S y C₂S). Los últimos dos, pueden estar rodeados de una o dos capas de material gelatinoso, presentando diferentes índices de refracción, o por capa de hidróxido de calcio. Los granos mas largos de residuo, pueden estar verdaderamente deshidratados y tener la menor birrefringencia (gris oscuro) de alita en secciones casi hexagonales distorsionadas y la birrefringencias visibles, para amarillos de primer orden de las laminas dobles en granos rodeados de belita. Aluminoferrita intersticial aparecen como granos prismáticos alineados en color, desde un color café hasta en café verdusco y a un color rojizo (barroso) con un indicio de refracción y un pleocreísmo disfrazado por el color del grano. Tricalcio aluminato, no es usualmente reconocido en secciones delgadas, porque la forma cúbica es isotropica o porque se hidrata muy temprano (en la historia de la hidratación del concreto), formado ettringita sub-microscópica, sulfato de tetracalcio aluminico hidratado con o sin otros uniones. Estos posiblemente son visibles en vacios del concreto antiguo, pero se diferencias en mejor forma por medio de la difracción de rayos "X".</p> <p>Cementos de diferente origen, tienen diferentes colores de aluminoferrita y los silicatos de calcio tienen colores verde claro, amarillo o blanco. Deberían ser posible combinar cementos de un solo origen.</p>

Continuación

CARACTERÍSTICAS DE LA PASTA DEL CEMENTO

La pasta de cemento normal, es (en luz natural) de color canela claro, variando un poco en el índice de refracción y conteniendo residuos de granos de cemento deshidratado. En concreto seccionado a una edad temprana o no curado adecuadamente, la pasta contiene granos de cemento deshidratado alineándose por debajo de unos pocos micrómetros en tamaños máximos con límites superiores tan largos como 100um, en diámetro máximo (si el cemento fue fundido en fabrica de cemento abierto, o fue deliberadamente fundido para áreas de pequeñas superficies, para reducir el color de la hidratación). Con nicotes rosados, la pasta normal es negra o muy gris aligerado a negro, con cristales poikiliticos esparcidos, o pequeñas segregaciones de hidróxido de calcio y residuos de granos de cemento esparcidos. En concretos con mayor cantidad de agua en reacción de cemento y agregado silíceos, los cristales de hidroxido de calcio son tan largos como el tamaño máximo de los granos de cemento restantes, cerca de 100um. En concretos con menor cantidad de agua la reacción de cemento, con mayor contenido de cemento, y con igual cantidad de agregados ya sea silíceo o carbonato, el tamaño máximo de cristales de hidróxido de calcio, es considerablemente epitaxial sobre la calcita).

La pasta de cemento que ha sido sometida a prolongadas colocaciones de acido Es baja en hidróxido de calcio (el cual se presenta recristalizado y con granos de anhedral precipitado cerca de las superficies exteriores). En concreto mayor a los 2 o 3 años de edad fabricado con cemento tipo I, II o III, se espera que tenga alguna ettringita como roseta en aire evacuado. Este es un fenómeno normal, para demostrar el ataque del sulfato debe establecerse químicamente que el contenido de SO_3 de el concreto, es mas grande de lo que debería ser suministrado por el contenido original de sulfato del cemento. Ettringita evacuada ha dañado el concreto, aunque podría acompañar ettringita sub-microscópica, en la pasta que ha dañado el concreto

