

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**PROPIEDADES DE ESCALAMIENTO DE LAS SUPERFICIES  
DE FRACTURA DEL CONCRETO**

**TESIS**  
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**  
**INGENIERO MECÁNICO ADMINISTRADOR**

**PRESENTA**  
**DENISSE ALEXANDRA MARTINEZ HERNANDEZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.**  
**NOVIEMBRE 2005**

TL  
TA440  
.M377  
2005  
c.1



1080170743

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



PROPIEDADES DE ESCALAMIENTO DE LAS SUPERFICIES  
DE FRACTURA DEL CONCRETO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO MECANICO ADMINISTRADOR.

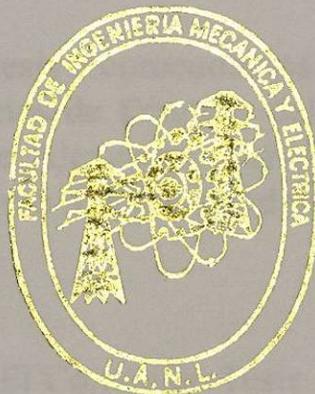
PRESENTA

DENISSE ALEXANDRA MARTINEZ HERNANDEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.  
NOVIEMBRE 2006



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



PROPIEDADES DE ESCALAMIENTO DE LAS SUPERFICIES  
DE FRACTURA DEL CONCRETO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO MECANICO ADMINISTRADOR

PRESENTA

DENISSE ALEXANDRA MARTINEZ HERNANDEZ

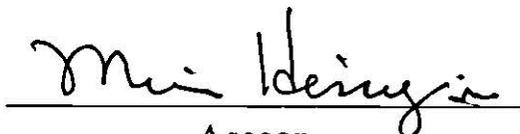
CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.  
NOVIEMBRE 2005

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Propiedades de Escalamiento de las Superficies de Fractura del Concreto" realizada por la pasante de Ingeniero Denisse Alexandra Martínez Hernández sea aceptada con opción al grado de Ingeniero Mecánico Administrador.

El Comité de Tesis



Asesor

Dr. Moisés Hinojosa Rivera



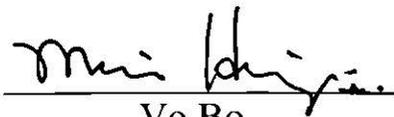
Coasesor

M.C. Jorge A. Aldaco Castañeda



Coasesor

M.C. Francisco Javier Garza Méndez



Vo.Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera  
Subdirector Académico

San Nicolás de los Garza, Nuevo León a Noviembre del 2005

## DEDICATORIA

Este presente trabajo va dedicado con todo mi amor, respeto y humildad para:

- ✓ **Dios.** Por prestarme la vida, salud, tiempo y espacio para lograr tantos sueños y alcanzar una de mis más grandes metas. Por las experiencias vividas que me permitieron llegar a la presentación de este importante proyecto. Gracias por todo lo que me das sin merecer, por tu compañía en cada momento, por tu comprensión, por tu amor. ¡Siempre Unidos Señor!
- ✓ **Mis Padres.** Por el apoyo físico, emocional, económico y espiritual. Porque siempre estuvieron conmigo ayudándome a librar tantos obstáculos que tuve que enfrentar. Papi por tus pláticas y testimonios que he aprovechado para aplicarlos en mi vida y a ti Mami por sacarme del abismo, por tus consejos, por tu escucha, tu cariño y comprensión. Ambos me han dado tanto que esta es una forma de agradecerles y recompensarles su esfuerzo y entrega para conmigo. Le doy gracias a Dios por las experiencias que me han dado, pero sobre todo por haberme aceptado como su hija. ¡Son lo mejor que me ha pasado!
- ✓ **Mis Hermanos.** Aydee y Pedro, que sería sin ustedes... me han apoyado, escuchado y demostrado su amor, respeto y amistad que con todo eso yo no compito.
- ✓ **Mí querido esposo Alejandro y mi preciosa Perlita.** Por su comprensión, su confianza en mí, su paciencia en mis arranques de desesperación, enojo y tristeza; por los momentos difíciles, por el cansancio, por su apoyo incondicional, por los momentos felices que me han regalado. Son un regalo que Dios me ha prestado para compartir mi vida y mis sueños.
- ✓ **Mis Familiares:** Papá Pedro (†) porque sé que desde el cielo tu me has cuidado y protegido; Mamá Conchita por tus valores, tu enseñanza, tu amor eterno, sé que nunca me has fallado; gracias por haberme cuidado y ayudarme a ver la vida de otra forma.

Mamá Ale y Papá Chuy porque siempre han estado al tanto de lo que me pasa, por su apoyo y sus oraciones.

A mis tíos (as), primos (as), sobrinos (as); en especial a mi tía Paty, Jaime, Julio y Cindy por ayudarme y facilitarme las cosas en Nueva Rosita; a mi tía Juany, tío Chalo, Jania, Mariana, Marianela y Gustavo por aceptarme en su familia los primeros tres años de mi carrera. A mi tía Mica, tío Chancho, Nora, Vero, Edna y Rel por también haberme recibido en su hogar y brindarme la confianza necesaria y el apoyo suficiente para reparar el daño emocional que viví.

- ✓ **Mi segunda Familia.** Papá Julián, Mamá Lupe, Mamá Clara, tío Manuel (†), tío José y tía Amparo por todo su cariño, consejo, apoyo y toda la confianza que han

depositado en mi, por permitirme terminar esta carrera y ayudarme a continuar mi preparación.

A Perla y Rodolfo, Rocío, Julián y Paty; por su entrega hacia mi persona, por sus preocupaciones, por los momentos que hemos vivido. Por su amistad, su ayuda, sé que a veces no lo digo o no lo demuestro pero de todo corazón, ¡Gracias por todo!

- ✓ **A mis amigos.** Maribel Hernández por invitarme a realizar este proyecto, a Tania, Marisela, Aleks y Carlos por apoyarme y compartir conmigo parte de sus enseñanzas y conocimientos en la DIM y en la Sub. Académica.

A Norma, Chuy, Rosy, Arturo, Alicia, Jessica, Susana y Julio por haberme escuchado, orientado, por esos 9 meses de cuidados y atenciones...por todos sus detalles.

A Rocío, Juanje, Johny, Juanita, Edith, Juan, Nelly, Yazmín, Caro, Robe, Karla, Juan Pablo, Rigo, Erica, Pepe, Paty, Perla, y Luz por ser mis guías y amigos espirituales, por su apoyo, su fraternidad, su entrega. Su lucha me ha ayudado a madurar en el camino de Dios y de la vida.

- ✓ **El mejor equipo de FIME.** Dr. Moisés Hinojosa Rivera mi guía en este proyecto, sus enseñanzas, conocimientos, su experiencia y positivismo me han hecho una persona no como usted pero si con algo similar. He aprendido tanto que usted es un ejemplo a seguir.

Ma. Guadalupe Mata Alfaro mi querida amiga, que te digo; te debo tantas cosas porque me enseñaste a tener siempre una sonrisa en mi rostro, a que todo se puede conseguir no importando los problemas, me escuchaste en varios momentos difíciles para mi y me instruiste y aconsejaste para conocer mas de la vida.

Dra. Patricia Zambrano por su amistad, su comprensión y por todo su apoyo.

- ✓ **Los Doctores de la salud** porque sin ellos no me hubiera recuperado de lo que pase. Es importante cuidar a los demás pero más importante es cuidarte a ti mismo para ofrecerle a los que te rodean una mejor parte de ti.
- ✓ **Ti Lector.** Porque has mostrado interés en una recopilación de mucho tiempo atrás que yo te puedo ofrecer. Espero puedas comprender y aprovechar cada parte de este escrito que con mucho esfuerzo he preparado para ti.

Poncho muchísimas gracias por la memoria (USB), Jorge y Cecy, Cano y Mary, por su ayuda económica y emocional, Víctor Páez y a Don Coco por su ayuda con lo del adaptador de la laptop.

Una final dedicatoria para todas las personas que quizás en estos momentos no están en mi memoria, espero no se me pase nadie porque muchos son los que me han apoyado y siguen aquí ocupando un lugar en mi mente y corazón.

## AGRADECIMIENTOS

Mil gracias a todo el equipo de investigación, a los colaboradores de este trabajo, a las personas sabias e inteligentes que aportaron un pedacito de sus conocimientos para que los resultados fueran los correctos. En especial a:

- **Adrián Alcaraz Aguilar.** Por haberme permitido continuar su investigación, por instruirme en este tema, por la proporción de bibliografía, imágenes, contactos, etc.
- **Dr. Cesar Antonio Juárez Alvarado.** Por la prestación de los servicios del Cuerpo Académico “Tecnología del Concreto” de la Facultad de Ingeniería Civil; así como también por la información y herramientas proporcionadas para la elaboración de el capítulo de experimentación.
- **Dra. Mari Aurora Rábago Ordóñez e Ing. Silvio Villarreal.** Por la prestación del equipo necesario para realizar las pruebas en el software del Instituto de Estadística Geografía e Informática- INEGI.

**Ing. Juan Carlos Delfín** del INEGI por su ayuda en la técnica de fotogrametría.

- **Ing. María Lara** de Peñoles, por su colaboración para el análisis por MEB.
- **Dr. Eugenio López.** Por su participación en la obtención del numero de datos de las imágenes en 3D de las muestras.
- **Dr. Virgilio González.** Por su destacada ayuda en el estudio autoafin realizado por el método variable de banda ancha.
- **Colegio Americano de Fotografía.** Por la serie de fotografías estéreo en una de las muestras.
- **Laboratorio de Manufactura de la Facultad de ciencias Químicas** por la obtención de coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  en 4 de las muestras.
- **Ing. Hilario García** de APM por la técnica en laboratorios MEB.
- **DIMAT** de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por el apoyo recibido en la realización de esta investigación.
- **Claudia Guerra** por tu ayuda en el MFA, por las imágenes, por tu apoyo y por tus consejos.
- **Marleth Mena y Yareni Lara** por su colaboración en la elaboración de probetas y pruebas de microscopía.

- **Ing. Fernando Elizondo** por la confianza depositada en mi al haberme facilitado los artículos de las revistas de Ingenierías de la FIME.
- **A los M.C. : Juan Antonio Franco Quintanilla, Indira Gary Escamilla Salazar, Delia Armendáriz, Ma. Guadalupe Ramírez López, Myriam Solano, Gabino Morales, Abel Montemayor, Mónica Mireles, Juan Antonio Herrera y Nelda Johana Gámez Treviño** por su apoyo, consejos, sus conocimientos, por el material proporcionado para la realización de este proyecto.

# ÍNDICE

	Página
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN	1
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.	2
CAPÍTULO 2.- MECÁNICA DE LA FRACTURA.	5
2.1 Introducción.	5
2.2 Importancia de la mecánica de la fractura.	5
2.2.1 Categorías de fractura en función de la deformación plástica.	6
2.2.2 Modos de carga.	11
2.3 Determinación del mecanismo de fractura de los metales.	12
2.3.1 Fractura dúctil.	12
2.3.2 Fractura frágil.	14
2.3.3 Fractura por fatiga.	15
2.3.4 Ruptura por termofluencia y esfuerzo.	17
2.3.5 Fracturas por esfuerzo asistidas por corrosión.	18
2.3.6 Fractura en materiales no metálicos.	19
2.4 Tipos de fractura.	19
2.4.1 Fractura dúctil.	19
2.4.2 Fractura frágil.	20
2.4.3 Fractura mixta.	20
2.5 Criterio de Griffith.	22
2.5.1 Mecánica de la fractura elástico-lineal.	25
CAPÍTULO 3.- FRACTOGRAFÍA Y FRACTOMETRÍA AUTOAFIN.	28
3.1 Introducción.	28
3.2 Fractografía.	28
3.2.1 Geometría de fractales.	29
3.2.2 Dimensión fractal: El concepto.	31
3.2.3 Autosimilitud, autoafinidad y escalamiento.	31
3.3 Fractometría: Instrumentos y herramientas.	34
3.3.1 Topometría: Rugosidad de superficies.	35
3.3.1.1 Técnicas y métodos para medir la rugosidad.	35
3.3.1.1.1 El perfilómetro.	35

3.3.1.1.2 Otros equipos.	36
3.3.1.1.3 Parámetros de rugosidad.	37
3.3.2 Microscopía de fuerza atómica (MFA).	39
<b>CAPÍTULO 4.- EXPERIMENTACIÓN.</b>	<b>41</b>
4.1	
Introducción.	41
4.2 Material utilizado.	41
4.3 Elaboración de probetas.	42
4.4 Caracterización de propiedades mecánicas.	46
4.4.1 Ensayo de flexión.	46
4.4.2 Resistencia a la compresión.	47
4.5 Caracterización estructural.	48
4.6 Fractografía.	48
4.6.1 Fotografía.	48
4.6.2 Microscopía electrónica de barrido.	49
4.6.3 Microscopía de fuerza atómica.	49
4.6.4 Digitalización tridimensional.	49
4.7 Fractometría autoafín.	50
4.7.1 Obtención de perfiles mediante digitalizador plano.	50
4.7.2 Análisis autoafín.	50
<b>CAPÍTULO 5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b>	<b>51</b>
5.1 Ensayo de flexión.	51
5.2 Resistencia a la compresión.	53
5.3 Fractografía y análisis de autoafinidad.	54
5.3.1 Fotografía.	54
5.3.2 Microscopía electrónica de barrido.	55
5.3.3 Imágenes fractográficas tridimensionales por MFA y digitalización por láser.	57
5.3.4 Perfiles de alturas obtenidos mediante el digitalizador plano.	59
5.3.5 Análisis de autoafinidad.	62
<b>CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS PARA TRABAJOS FUTUROS.</b>	<b>63</b>
6.1 Conclusiones.	63
6.2 Perspectivas para trabajos futuros.	64
<b>APÉNDICE</b>	<b>65</b>

<b>A1.- EL CONCRETO.</b>	65
<b>A2.- MÓDULO WEIBULL Y MÓDULO DE RUPTURA.</b>	90
<b>A3.- FOTOGRAMETRÍA.</b>	96
<b>REFERENCIAS</b>	113
<b>LISTADO DE FIGURAS</b>	115
<b>LISTADO DE TABLAS</b>	122
<b>AUTOBIOGRAFÍA</b>	123

## RESUMEN

Las superficies de fractura son objetos autoafines, caracterizados mediante parámetros como el exponente de Hurst. Existen muchos trabajos que documentan el carácter autoafín de dichas superficies, en materiales metálicos y cerámicos; en lo que respecta a materiales plásticos y compósitos la evidencia experimental en la literatura no es muy abundante. Por otro lado, existen muchísimos trabajos acerca de descripciones fractográficas en todo tipo de materiales, incluyendo el concreto.

El presente trabajo es un estudio que integra el análisis fractográfico y el estudio autoafín de muestras de concreto de resistencia media. El objetivo principal es documentar un estudio completo que incluye desde la formulación del concreto, su caracterización microestructural y mecánica, el estudio fractográfico por microscopía electrónica de barrido, elaboración de pares estereográficos por fotografía convencional, digitalización tridimensional, microscopía de fuerza atómica y el análisis autoafín a partir de perfiles de alturas.

Se elaboraron 24 muestras, se determinó la resistencia a la compresión y se llevaron a cabo ensayos de flexión para generar superficies de fractura y estimar el módulo de Weibull. A partir de fotografías convencionales se elaboraron pares estereográficos que podrían aprovecharse posteriormente para un estudio fotogramétrico. La microestructura del concreto se caracterizó por Microscopía Electrónica de Barrido. Se realizaron observaciones de microscopía de fuerza atómica. Adicionalmente se capturaron perfiles de alturas con ayuda de un digitalizador y software de análisis de imágenes. A partir de estos perfiles se determinó el exponente de rugosidad, con valor cercano a 0.8.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Cuando un material se rompe se generan superficies llamadas “superficies de fractura”, éstas son el resultado del avance de grietas, a su vez las grietas se abren paso a través del material siguiendo trayectorias que son en mayor o menor grado aleatorias o caprichosas. El avance de las grietas es propulsado por la existencia de una fuerza motriz, generalmente una carga o fuerza externa que se traduce en un campo de esfuerzos, que es amplificado en la vecindad del frente de la grieta, de manera que a nivel local se supera la resistencia cohesiva del material. El origen del fenómeno de la fractura se encuentra, entonces, en la ruptura de los enlaces entre los átomos o moléculas que conforman el material.

Está claro que la ruptura de estructuras, máquinas, vehículos, tuberías, etc. le cuestan a la sociedad millones y millones de pesos, además de vidas humanas, así que la importancia de dicho fenómeno no puede exagerarse. Está muy claro además que año con año siguen presentándose fallas catastróficas donde se supone que se aplicó el material adecuado, donde los mejores diseñadores dimensionaron cada pieza y cada detalle escrupulosamente de acuerdo a las más estrictas normas. Esto se debe a que queda mucho por saber acerca de las grietas, los materiales y las superficies de fractura.

El énfasis en el estudio de las superficies de fractura (“fractografía”) surge de la hipótesis de que en ellas está grabada la historia de la propagación de las grietas. A través del análisis de las superficies, un ingeniero puede decir si la falla fue de naturaleza “dúctil” o “frágil”, dependiendo de la evidencia de deformación permanente (“plástica”) o de la ausencia de ella. Un materiólogo puede ir más allá y decir si la propagación de las grietas fue intergranular o transgranular, en una pieza metálica policristalina, por ejemplo. Un experto en análisis de fallas puede decir si la ruptura se originó por un abuso o una sobrecarga, o por una deficiencia en el material imputable a un proveedor.

A través del tiempo se han estudiado las fracturas en todo tipo de materiales: en cerámicos, en metales, en los plásticos y en los materiales compuestos. Puede decirse, sin embargo, que los especialistas de cada tipo de materiales han desarrollado su propia terminología, sus propias herramientas y aún sus propias teorías y explicaciones. Así, la fractografía de los metales es tradicionalmente territorio exclusivo de los metalurgistas, mientras que existen voluminosos tratados de fractografía del vidrio dedicados expresamente a ceramistas especializados. Más aún, la propagación de grietas macroscópicas en la corteza terrestre (fallas geológicas), parece todavía campo exclusivo de estudio por parte de los geólogos.

Sin embargo, recordando que todas las fracturas son el resultado de la ruptura de enlaces y que las trayectorias de las grietas no son simples líneas rectas, euclidianas, resulta tentador esperar que existan factores o características comunes en el fenómeno y sus resultados, independientemente del sistema o material de estudio.

El señor Mandelbrot fue el primero en demostrar que las superficies de fractura de metales presentan un carácter fractal que es cuantificable. Otros investigadores han demostrado que lo mismo es válido para la fractura de todo tipo de materiales. El carácter fractal o autoafín (siendo más correcto este último término) se expresa a través de parámetros como el exponente de Hurst, que caracteriza una ley de potencia y que es también llamado exponente de rugosidad. Se han desarrollado diversos métodos para determinar dicho parámetro, entre otros está el método de ventanas de ancho variable, que se emplea en este trabajo en un cálculo exploratorio del exponente de rugosidad de las superficies de fractura de muestras de concreto. En general, para cuantificar el carácter autoafín es necesario contar con perfiles de altura o con mapas de elevación, así que las técnicas topográficas cuantitativas (“topométricas”) son vitales. En su trabajo pionero Mandelbrot desarrolló la relativamente compleja técnica del “slit island analysis”, que implica recubrir una superficie de fractura y posteriormente aplicar técnicas metalográficas y observaciones por microscopía óptica. Posteriormente otros investigadores han aplicado la microscopía electrónica, la microscopía de fuerza atómica y tunelamiento, y la perfilometría, entre otras técnicas experimentales.

El presente trabajo aborda el estudio del carácter autoafín de las superficies de fractura del concreto, a través de la exploración y el uso concurrente de distintas técnicas topométricas, tratando de cubrir la mayor cantidad de escalas de observación posibles con los recursos técnicos disponibles.

En el contexto de una línea de investigación vigorosa a nivel mundial, el grupo de investigación de la fractura autoafín en la FIME-UANL ha estudiado materiales de interés para la industria y la economía regional; así se han estudiado metales como aleaciones Al-Si y aceros al carbono, cerámicos como el vidrio sódico-cálcico, vidrio opalino y cerámica arcillosa y polímeros como el nylon, poliestireno y polipropileno. También se han estudiado materiales que pueden ser considerados medios cuasibidimensionales como el “papel” de aluminio y el papel convencional de celulosa. Para redondear este espectro de materiales con un importante material compósito se aborda el estudio del concreto, que además de ser un importantísimo material en la economía regional es, por mucho, el material estructural más empleado en el mundo.

El concreto es un material especial por diversas razones, aquí queremos enfatizar algunas observaciones; en un curso convencional de ciencia de materiales los compósitos generalmente no son objeto de una gran atención y el concreto en particular solo en ocasiones se discute. Por supuesto, los ingenieros civiles le otorgan la mayor importancia, sin embargo, en general, por tratarse de un “humilde” o “modesto” “material de construcción”, no recibe casi nunca especial atención entre la mayoría de los materiólogos. Más aún, en la literatura especializada en el concreto es difícil encontrar estudios fractográficos extensos. Por supuesto que existen trabajos muy importantes, sin embargo aún no salen de los “journals” especializados, como sí han salido ya los trabajos similares relacionados con metales, cerámicos y polímeros.

La gran heterogeneidad microestructural del concreto lo hace un material fascinante, ya que existen diversos componentes, los cuales a su vez no son homogéneos sino que manifiestan aspectos variantes a todas las escalas. Si bien los agregados gruesos pueden estar en las

escalas de centímetros, existen elementos estructurales en las zonas de transición con estructura micrométrica y aún nanométrica, amén de los defectos como porosidades, burbujas y grietas que pueden existir también en prácticamente todas las escalas. Esto hace que el estudio cuantitativo del carácter autoafín de las superficies de fractura del concreto no sea una empresa fácil y directa, es necesario recurrir a distintas técnicas de manera combinada.

Es por eso que en el presente trabajo nos hemos dado a la tarea de conjuntar técnicas como la microscopía electrónica de barrido, la microscopía de fuerza atómica, la digitalización de perfiles de fractura, la digitalización tridimensional por láser, la construcción de pares estereográficos, el análisis de imágenes, así como un método autoafín para determinar el exponente de rugosidad de las superficies de fractura en flexión en tres puntos. Como trabajo previo, se realizó la formulación y caracterización de probetas por métodos convencionales.

El objetivo principal de este trabajo es documentar la posibilidad de utilizar con éxito y simultáneamente las diversas técnicas arriba mencionadas, como un paso previo y necesario para abordar la misión de dilucidar incuestionablemente el carácter autoafín de las superficies de fractura en el concreto, a través de la descripción y el análisis desde la escala atómica hasta tamaños de una decena de centímetros. De manera que pueda en un futuro estudiarse incluso la cinética de ruptura, buscando distintos exponentes de rugosidad y determinando la longitud de correlación, misma que de acuerdo al modelo de líneas puede especularse que debe ser del orden del tamaño o longitud característica de los agregados gruesos.

Como podrá verse en lo subsecuente, este trabajo exploratorio ha tenido éxito en documentar el exponente llamado “universal” o atractor, para condiciones de fractura rápida en medio tridimensional y modo I, con valor cercano a 0.8.

## CAPÍTULO 2

### MECÁNICA DE LA FRACTURA

#### 2.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se expone una discusión que engloba los principales aspectos de la mecánica de la fractura lineal elástica, incluyendo también la descripción de los modos de carga y de propagación de grietas.

#### 2.2 IMPORTANCIA DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA.

La mecánica de la fractura [1-6] estudia el comportamiento de los materiales con fisuras u otros pequeños defectos. Esta constituye un conjunto de teorías y técnicas experimentales cuyo objetivo primordial es establecer criterios de falla para los cuerpos sólidos que sean independientes de la geometría de los mismos e idealmente de las condiciones de ensayo. Sin embargo, la caracterización de la resistencia a la fractura de los materiales es solo uno de los aspectos de la mecánica de la fractura. Para poder aplicar sus conceptos al diseño de piezas, es necesario contar con expresiones matemáticas que relacionen los esfuerzos y el tamaño de defecto con la tenacidad del material.

La tenacidad a la fractura [1] mide la capacidad de un material que contiene un defecto, a resistir una carga aplicada y es una propiedad cuantitativa del material.

El esfuerzo aplicado al material se intensifica por el defecto, el cual actúa como un concentrador de esfuerzos. Para un ensayo simple, el factor de intensidad de esfuerzo  $K$  es:

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a}, \quad (2.1)$$

Donde  $f$  es un factor geométrico relacionado a la probeta y al defecto,  $\sigma$ , es el esfuerzo aplicado, y  $a$  es el tamaño del defecto. Si la muestra es de ancho "infinito", entonces  $f \cong 1.0$ .

Este factor de intensidad de esfuerzo crítico se define como la tenacidad a la fractura  $K_c$ :

$$K_c = K \text{ requerido para que una grieta se propague}$$

Conforme se incrementa el espesor, la tenacidad a la fractura,  $K_c$ , disminuye hasta un valor constante. Se conoce como la tenacidad a la fractura en deformación plana,  $K_{Ic}$ , y sus unidades son, ksi,  $\text{plg} = 1.0989 \text{ MPa} \cdot \text{m}$ .

La mecánica de la fractura permite diseñar y seleccionar materiales y al mismo tiempo tomar en consideración la inevitable presencia de defectos. Se deben considerar tres variables: la propiedad del material ( $K_c$  o  $K_{Ic}$ ), el esfuerzo,  $\sigma$ , que debe resistir el material y el tamaño del defecto. Si se conocen dos de estas variables, se puede determinar la tercera.

En algunos materiales el esfuerzo límite para la falla por fatiga es aproximadamente la mitad de su resistencia a la tensión. La relación se conoce como relación de fatiga:

$$\text{Relación de fatiga} = \frac{\text{Esfuerzo límite para fatiga}}{\text{Resistencia a la tensión}} \approx 0.5$$

Los defectos de diseño concentran los esfuerzos, reduciendo el esfuerzo límite para fatiga y la resistencia a fatiga. Algunas veces la superficie del material debe pulirse finamente para minimizar la posibilidad de falla por fatiga.

### 2.2.1 Categorías de fractura en función de la deformación plástica.

Existen varias metodologías de análisis de componentes agrietados, dependiendo de la extensión de la deformación de análisis que precede a la fractura. De acuerdo con la extensión de la deformación plástica, las categorías de la fractura [3,6,7] son:

- **Fractura lineal elástica:** Cuando la extensión de la zona plástica está confinada a una pequeña región frente a la punta de la grieta y la deformación del resto del cuerpo es elástica.
- **Fractura elasto-plástica:** La zona plástica se extiende en el total remanente del ancho de la pieza, pero permaneciendo como una región relativamente estrecha alrededor del plano de la grieta.
- **Colapso plástico:** La fractura es precedida de deformación plástica generalizada.

En la figura 2.1 podemos observar estas tres categorías.

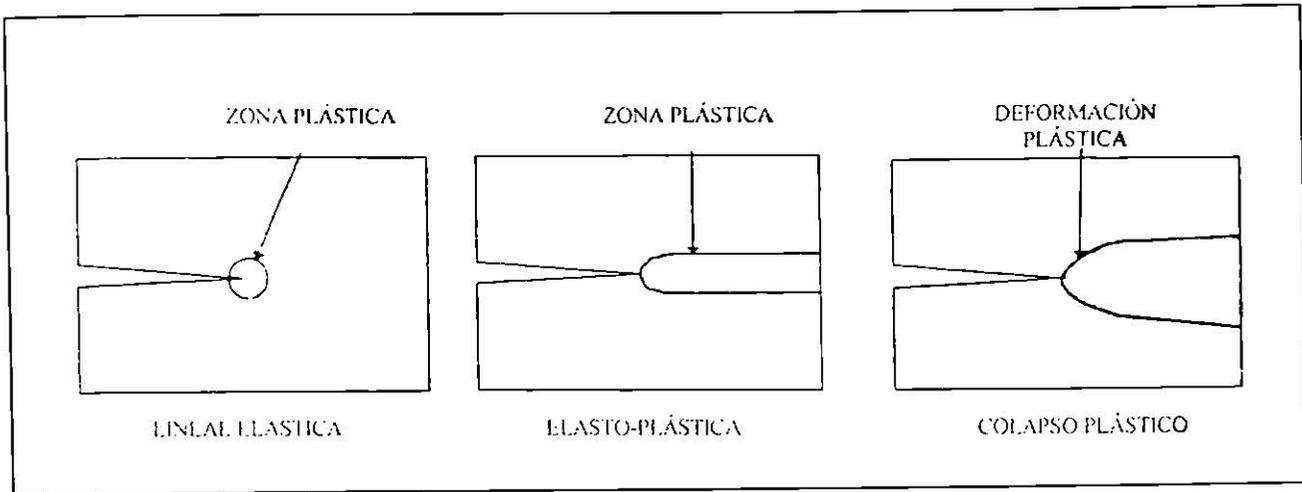


Figura 2.1.- Categorías de la fractura de acuerdo a la extensión de la zona plástica. [6]

Llamamos *modo de falla* [3] al fenómeno o mecanismo responsable del evento o condición de falla. En este sentido, los modos de falla que en general pueden afectar a un componente estructural, son:

- Inestabilidad elástica (pandeo local o generalizado).
- Excesiva deformación elástica.
- Excesiva deformación plástica (fluencia generalizada).
- Inestabilidad plástica (estricción, pandeo plástico).
- Fatiga de alto ciclo y bajo ciclo.
- Corrosión, erosión, corrosión-fatiga, corrosión bajo tensiones, etc.
- Creep y creep-fatiga.

Los cuatro primeros modos de falla pueden atribuirse fundamentalmente a fallas en el diseño del elemento estructural (excepto en el caso en que la falla se produzca como consecuencia de una carga superior a las máximas previstas en el diseño). Los cuatro modos mencionados en último término, si bien pueden ser causados por un diseño incorrecto, obedecen muchas veces a factores introducidos durante las etapas de fabricación del elemento.

El modo de falla por excesiva deformación elástica se produce por ejemplo cada vez que una pieza que debe mantener sus dimensiones dentro de ciertos límites, sufre una deformación elástica que hace que aquellas excedan el valor admisible, conduciendo a problemas de interferencia tales como atascamiento o a deflexiones excesivas. La forma más común del modo de falla por inestabilidad elástica es la constituida por el fenómeno de pandeo que se ilustra en la figura 2.2.

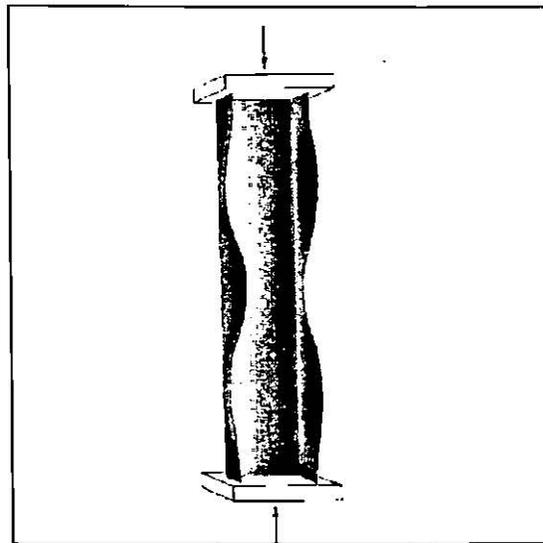


Figura 2.2.- Pandeo de un perfil "U". [3]

Este se produce cuando un elemento estructural esbelto tal como una columna se somete a una carga de compresión suficientemente alta según su eje longitudinal. Puede demostrarse que existe una carga que depende del momento de inercia de la sección resistente, del módulo elástico del material, y de la forma de sujeción del elemento, por encima de la cual las deflexiones laterales crecen sin límite conduciendo a la destrucción del componente. El fenómeno de pandeo puede adoptar una forma global, es decir afectar a todo el componente como en el caso de una columna, o ser local afectando sólo una parte de la estructura como ocurriría en el caso de una fabricación con paneles en compresión donde sólo alguno de tales paneles sufre pandeo.

La excesiva deformación plástica constituye sin duda el modo de falla mejor comprendido, y es la base del diseño clásico de componentes estructurales. En efecto, dicho diseño tiene como objetivo fundamental establecer las dimensiones de las secciones resistentes necesarias para asegurar un comportamiento elástico de las mismas. Esto significa en teoría que en ningún punto de una sección resistente se alcance una condición de fluencia, es decir de deformación plástica. Sin embargo, en las estructuras reales, la presencia de concentradores de tensión más o menos severos es inevitable y por lo tanto también lo es la existencia de zonas plastificadas en el vértice de tales concentradores. De todos modos, en la medida que el tamaño de tales zonas plásticas sea pequeño en relación con las dimensiones características de la sección resistente, puede considerarse que la sección se comportará, al menos desde un punto de vista ingenieril, de manera elástica. En cambio, si por un incremento en las cargas las zonas plásticas se propagan hasta alcanzar una fracción significativa de la sección, nos encontramos ante una falla por excesiva deformación plástica. En el caso extremo, la sección completa puede llegar a plastificarse y en tal caso hablamos de una condición de fluencia generalizada.

Una discontinuidad que actúa como concentrador de tensiones puede iniciar bajo cargas cíclicas una fisura por fatiga que puede propagarse lentamente hasta alcanzar un tamaño crítico a partir del cual crece de manera rápida, pudiendo conducir al colapso casi

instantáneo de la estructura afectada. En presencia de cargas fluctuantes, en el vértice de discontinuidades geométricas más o menos agudas se produce un fenómeno de deformación elasto-plástica cíclica a partir del cual se produce la iniciación de la fisura por fatiga. La condición superficial y la naturaleza del medio cumplen un rol importante sobre la resistencia a la fatiga, esto es sobre el número de ciclos necesarios para que aparezca la fisura.

La figura 2.3 muestra la superficie de fractura de un eje en el que se inició una fisura por fatiga a partir del concentrador de tensiones representado por el alojamiento de la chaveta.

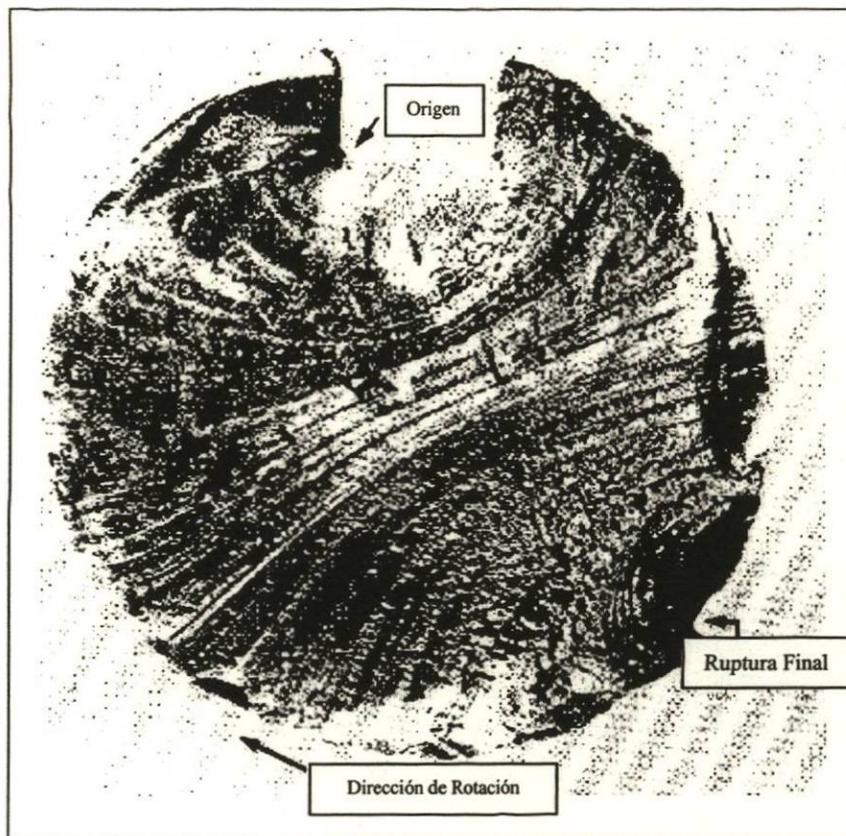


Figura 2.3.- Rotura por fatiga de un eje iniciada en el alojamiento de la chaveta. [3]

Una vez iniciada la fisura, la misma continuó creciendo progresivamente por fatiga bajo los sucesivos ciclos de carga hasta que la sección resultó incapaz de soportar la carga, lo que condujo a la ruptura final del eje. Las sucesivas posiciones de la fisura durante su crecimiento lento pueden observarse en las marcas denominadas “líneas de playa” que son una característica macroscópica frecuente de las superficies de fractura por fatiga.

Si bien las deformaciones elásticas y plásticas que sufre un material se suelen idealizar asumiendo que las mismas se producen de manera instantánea al aplicarse la fuerza que las

origina. La deformación que puede desarrollarse posteriormente en algunas situaciones y que progresa en general con el tiempo, se conoce con el nombre de *creep* ó termofluencia.

Para los materiales metálicos y los cerámicos, la deformación por creep se torna significativa por encima del intervalo de temperaturas de 0.3 a 0.6 de  $T_f$ , donde  $T_f$  es la temperatura absoluta de fusión del material. Por el contrario, para los vidrios y polímeros la temperatura a la cual los fenómenos de creep se tornan importantes se encuentra alrededor de la temperatura ( $T_g$ ) de transición vítrea del material. De manera que mientras los metales en general no sufrirán efectos de creep a temperatura ambiente, muchos vidrios y polímeros lo harán.

Cuando el fenómeno de creep se combina con el de fatiga, se tiene una situación conocida como creep-fatiga.

Si bien la diferenciación anterior es de gran importancia conceptual y práctica, desde el punto de vista ingenieril es también importante caracterizar el proceso de fractura según la velocidad con que se desarrolla. Desde este punto de vista la fractura rápida se caracteriza por la propagación inestable de una fisura en una estructura; en otras palabras, una vez que la fisura comienza crecer, el sistema de cargas de por sí produce una propagación acelerada de aquella. Las velocidades de propagación pueden ser desde unos centenares a algunos miles de metros por segundo. Este tipo de fractura rápida puede o no estar precedida por una extensión lenta de la fisura. La extensión lenta de una fisura, en cambio, es una propagación estable y que requiere para su mantenimiento un incremento continuo de las cargas aplicadas.

La fractura rápida constituye el modo de falla más catastrófico y letal de todos los mencionados. La misma se produce en general bajo cargas normales de servicio, muchas veces inferiores a las de diseño. Por tal motivo, la fractura rápida no es precedida por deformaciones macroscópicas que permitan tomar medidas para evitarla o para reducir la gravedad de sus consecuencias. Una vez iniciada, pocas veces se detiene antes de producir la ruptura completa de componente.

Las características que adopta en general la falla por fractura rápida, y que explican en parte el alto costo en vidas y bienes frecuentemente asociados con este tipo de evento, son las siguientes: en primer lugar, la falla se produce de manera totalmente sorpresiva y progresa a muy alta velocidad, típicamente entre algunos centenares y algunos miles de metros por segundo. Como se ha mencionado, la falla suele ocurrir cuando el componente está sometido a tensiones compatibles con las de diseño, y muchas veces inferiores a la máxima prevista. Finalmente, el origen de la falla se debe muchas veces a factores ajenos al diseño que son introducidos durante fabricación, no siendo detectados como factores potenciales de riesgo por los responsables de la construcción e inspección del componente.

### 2.2.2 Modos de carga.

Existen varios modos de carga [2,4,6] que pueden ser aplicados a una grieta, lo observamos en la figura 2.4. Estos modos se derivan directamente de las tres posibles direcciones de la tensión que pueden existir en el plano de una grieta.

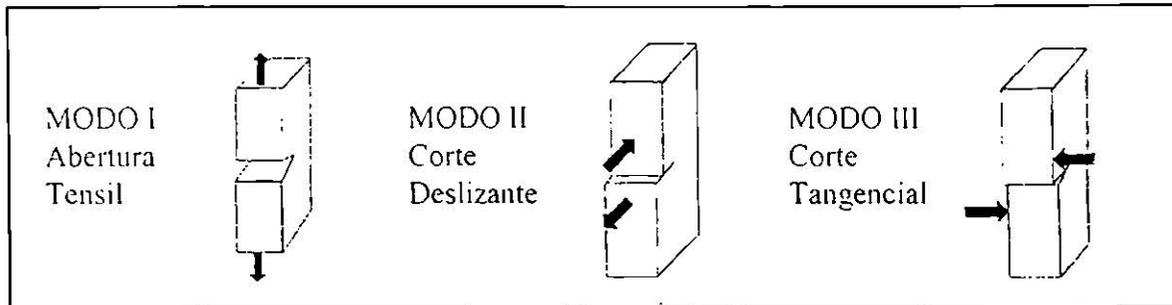


Figura 2.4.- Modos de deformación de grieta. [6]

Los tres tipos de movimientos relativos de dos superficies de grieta son clasificados como: El modo I; Abertura o modo de tensión de la grieta, se refiere a un esfuerzo tensil aplicado en la dirección normal a las caras de la grieta. Este es el modo usual para pruebas de tenacidad determinando el valor crítico de intensidad de esfuerzos como  $K_{Ic}$ . El modo II; Modo Deslizante o Cortante en un plano, se refiere a un esfuerzo de corte aplicado normal al borde principal de la grieta pero en el plano de la grieta. El modo III, Modo de Desgarramiento o de Cortante de Antiplano, implica esfuerzos de corte paralelos al borde principal de la grieta.

Así pues, en un sistema de carga complejo el campo de tensiones en el frente de grieta puede descomponerse, aplicando el principio de superposición en:

$$\sigma_{total} = \sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III} \quad (2.2)$$

Usualmente se indica el modo de sollicitación de apertura por medio de un subíndice, I, II o III. De los tres modos presentados en la figura 2.5, el modo I es el de mayor importancia técnica pues conlleva roturas más sencillas y se asemeja más a la configuración de una grieta que crece bajo un estado tensional de carga.

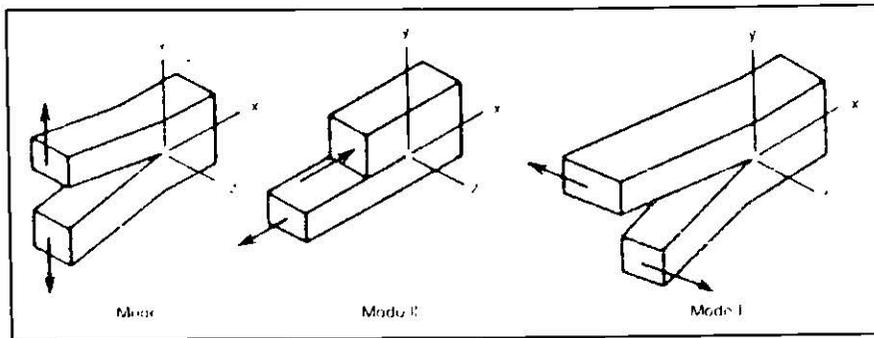


Figura 2.5.- Modos básicos de carga. [2]

## 2.3 DETERMINACIÓN DEL MECANISMO DE FRACTURA DE LOS METALES.

A pesar de todo lo que se sabe sobre el comportamiento de los materiales, frecuentemente ocurren fallas. El origen de estas fallas se encuentra generalmente en un diseño inadecuado, una mala selección de los materiales y un defectuoso procesamiento de los mismos, así como su abuso.

Para determinar la causa de la falla es indispensable una comprensión del mecanismo de fractura. Se discutirán cinco mecanismos comunes de fractura[1]: fallas dúctiles, por fatiga, ruptura por termofluencia y esfuerzo, y corrosión asistida por esfuerzo.

### 2.3.1 Fractura dúctil.

Ocurre de una manera transgranular (a través de los granos) en los metales con buena ductilidad y tenacidad. En el componente que falla, se observará gran deformación, incluyendo estricción. Antes de la fractura final aparece una deformación. Este tipo de fractura es causada por sobrecarga o por aplicar un esfuerzo muy elevado al material.

La deformación por deslizamiento también contribuye a la fractura dúctil de un metal. Se sabe que el deslizamiento ocurre cuando el esfuerzo cortante resultante llega al esfuerzo cortante resultante crítico; estos esfuerzos son más elevados cuando están en un ángulo de  $45^\circ$  en relación con el esfuerzo de tensión aplicado (Ley de Schmid).

Cuando en un ensayo de tensión se esfuerza un material dúctil, se inicia una estricción formándose huecos que empiezan cerca del centro de la barra, debido a nucleación en los bordes de grano o en las inclusiones. Conforme continúa la deformación, se puede formar un labio de corte, produciéndose una fractura final en copa y cono (figura 2.6).

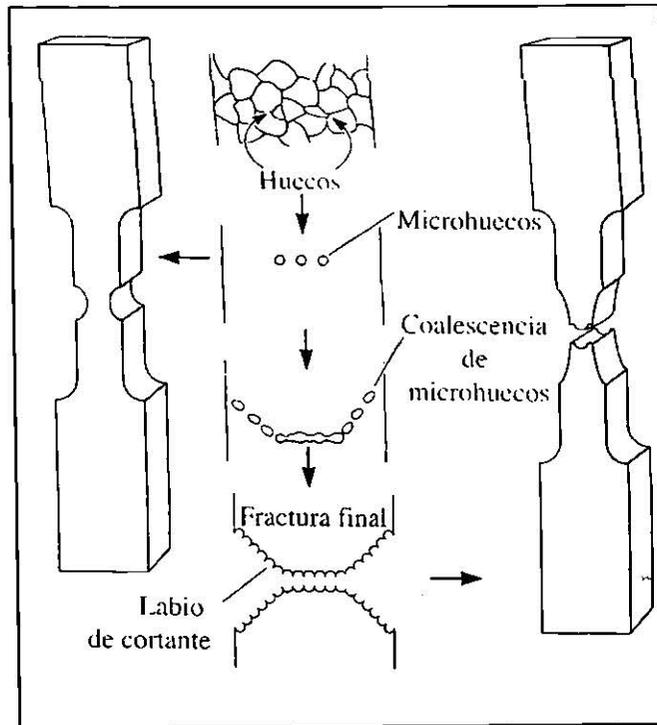


Figura 2.6.- Cuando se somete a tensión un material dúctil en un ensayo, comienzan a formarse un cuello y huecos, iniciando cerca del centro de la barra, por nucleación en límites de grano o inclusiones. A medida que continúa la deformación, se puede formar un labio de corte y producirse una fractura tipo copa y cono. [1]

En la figura 2.7 se aprecia la fractura de copa y cono observada cuando se rompe un material dúctil (en este caso un acero 1018 recocido) en una prueba de tensión. El diámetro original de la barra de prueba era de 0.505 plg.

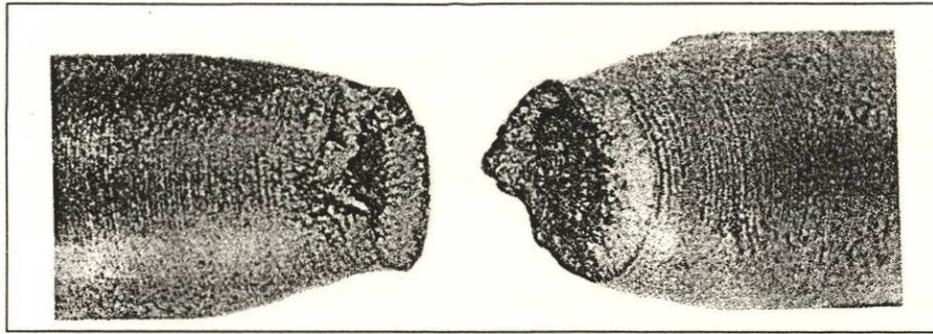


Figura 2.7.- Fractura de copa y cono observada cuando se rompe un material dúctil (en este caso un acero 1018 recocido) en una prueba de tensión. El diámetro original de la barra era de 0.505 plg. [1]

Se observa que durante la fractura dúctil se forman rugosidades, tal es el caso de la figura 2.8. En el centro, donde crecen los microhuecos, se forman rugosidades equiaxiales. En el labio de corte se forman rugosidades alargadas, apuntando hacia el origen de la falla.

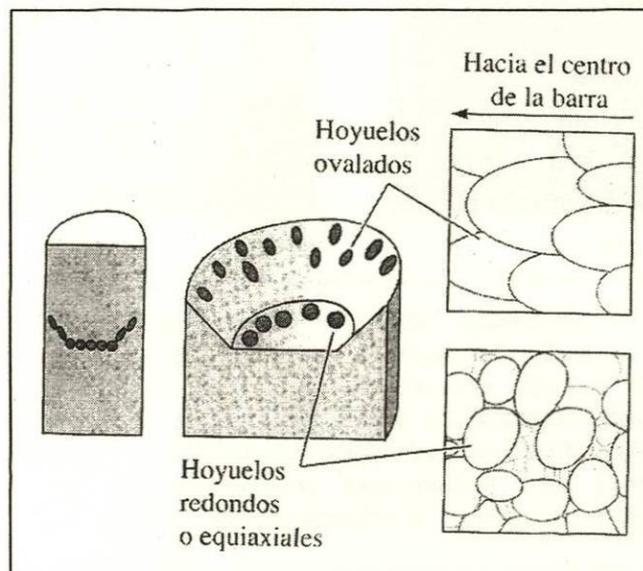


Figura 2.8.- Hoyuelos que se forman en una fractura dúctil. En el centro se forman Hoyuelos equiaxiales, donde crecen los microhuecos. Los hoyuelos alargados, que apuntan hacia el origen de la falla, se forman en el labio de corte. [1]

### 2.3.2 Fractura frágil.

Frecuentemente se observan fallas frágiles cuando es el impacto en vez de la sobrecarga lo que causa la falla.

En la fractura frágil se presenta poca o ninguna deformación plástica. Normalmente la

iniciación de la grieta ocurre en los defectos pequeños, que causan una concentración de esfuerzos. Normalmente, la grieta se propaga con mayor facilidad a lo largo de los planos cristalográficos específicos, a menudo planos  $\{100\}$ , por agrietamiento. En algunos casos, sin embargo, la grieta puede tomar una trayectoria intergranular (a lo largo de los bordes del grano) particularmente cuando existan segregaciones o inclusiones, que debiliten los bordes del grano.

Una de las características comunes de la fractura es un patrón de Chevrón, producido por diferentes frentes de grieta que se propagan en distintos niveles del material. Un patrón radiante de marcas superficiales o crestas, se extiende desde el origen de la grieta. El patrón de Chevrón se aprecia a simple vista, o con lente de aumento; así, se puede identificar la naturaleza frágil de la falla y el origen de la misma (figura 2.9).

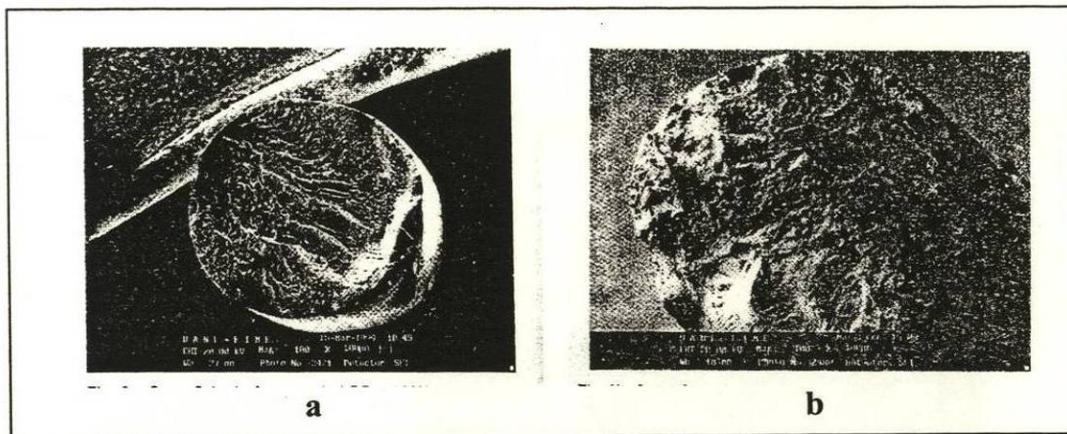


Figura 2.9.- (a) Superficie de Fractura de Propileno Isotáctico, en el extremo contrario a donde convergen las marcas de Chevrón se observan una serie morfologías cuya apariencia es en forma de escalones. (b) Superficie de fractura de poliestireno; se distinguen dos zonas, una cercana donde se originó la propagación del frente grieta y que tiene apariencia más lisa que la otra. Las marcas de Chevrón no son tan definidas como en (a), sin embargo a mayores magnificaciones es posible identificarlas. [8]

### 2.3.3 Fractura por fatiga.

Un metal falla por fatiga cuando se le aplica un esfuerzo alternante más elevado que el límite de resistencia a la fatiga. La fractura ocurre en un proceso de tres pasos que implica (1) La nucleación de una grieta, (2) Una propagación lenta y cíclica de la grieta y (3) La falla catastrófica del metal. Normalmente, los lugares de nucleación se encuentran sobre o cerca de la superficie, donde el esfuerzo es máximo y esto incluye defectos superficiales como ralladuras o picaduras, esquinas agudas debido a mal diseño o fabricación incorrecta, a inclusiones, a bordes de grano y a concentración de dislocaciones.

Una vez nucleada, la grieta crece hacia regiones de esfuerzo menor. La grieta se propaga un

poco mas en cada ciclo, hasta que se alcanza la capacidad de carga del metal restante, esto ocurre debido a los esfuerzos concentrados en el extremo.

La falla por fractura puede identificarse de manera que en la superficie cerca de su origen esta es típicamente lisa, se va haciendo más rugosa o áspera conforme la grieta original aumenta de tamaño y puede presentar una apariencia fibrosa a lo largo de la propagación final de la grieta.

Como podemos observar en la figura 2.10, mediante un examen microscópico y macroscópico se revela la superficie de fractura que incluye un patrón de marcas de playa y estriado.

Las marcas de playa se forman durante el servicio cuando la carga cambia, o cuando la carga es intermitente, dando quizás tiempo para la oxidación dentro de la grieta.

Las estriás, que se observan a una escala más fina, muestran la posición del frente de la grieta después de cada ciclo.

Las marcas de playa siempre sugieren una falla de fatiga, aunque la ausencia de tales marcas no descarta este tipo de falla.

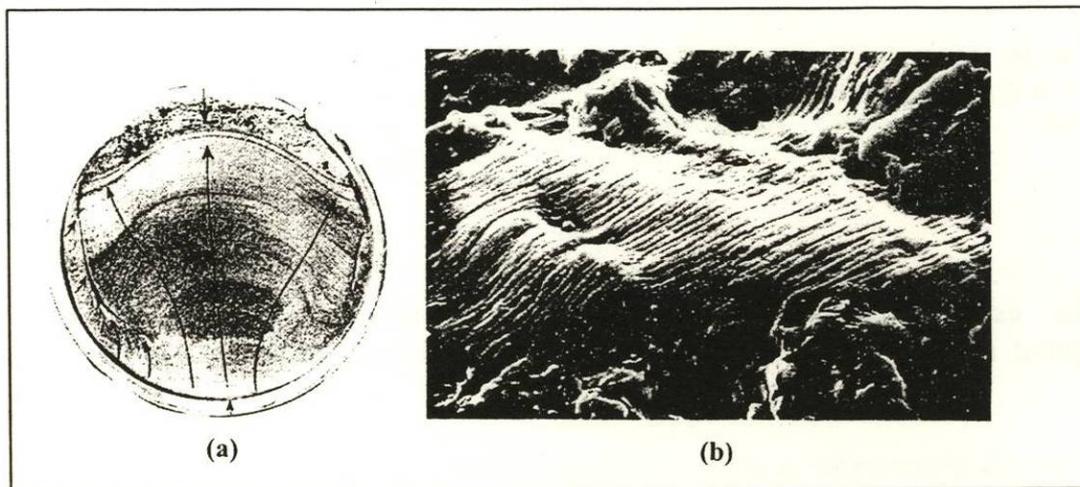


Figura 2.10.- Superficie de la fractura por fatiga. [a] A bajas magnificaciones, el patrón de marcas de playa indica que la fatiga fue el mecanismo de la fractura. Las flechas indican la dirección de crecimiento del frente de grieta, cuyo origen está en la parte inferior. [b] En altas magnificaciones se observan las estriaciones, muy cercanas entre sí, que se formaron durante la fatiga [1000x]. [1]

### 2.3.4 Ruptura por termofluencia y esfuerzo.

A temperaturas elevadas, un metal experimenta deformación plástica térmicamente inducida, aún cuando el esfuerzo aplicado sea inferior al esfuerzo de cedencia nominal. A menudo la fractura viene acompañada de una estricción, nucleación y coalescencias de huecos, así como deslizamiento de bordes de grano. Obsérvese en la figura 2.11.

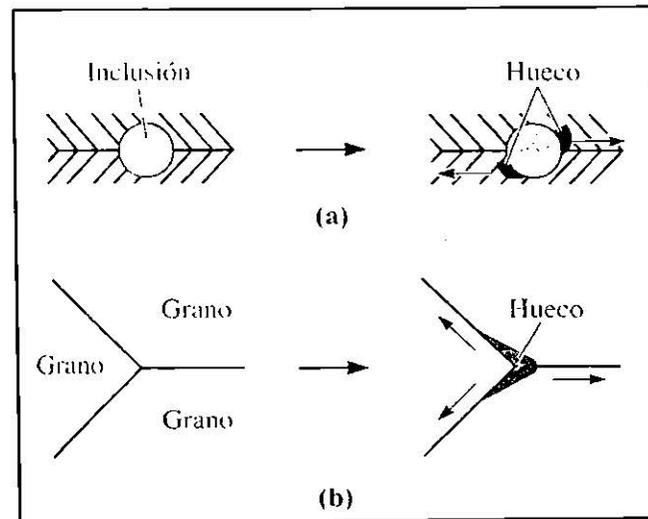


Figura 2.11.- Deslizamiento de límites de grano durante la termofluencia; causa a) La formación de huecos en una inclusión atrapada en el límite de grano y (b) La creación de un hueco en un punto triple, donde hay tres granos en contacto. [1]

Las fallas de ruptura por esfuerzo dúctil generalmente ocurren a altas tasas de termofluencia y a relativamente bajas temperaturas de exposición y tienen tiempos de ruptura cortos.

La falla frágil típicamente ocurre por formación de huecos en la intersección de tres bordes de grano y por la precipitación de huecos adicional a lo largo de los bordes de grano mediante procesos de difusión. En la figura 2.12 se presentan cavidades de termofluencia formados en los límites de grano en el acero inoxidable austenítico.

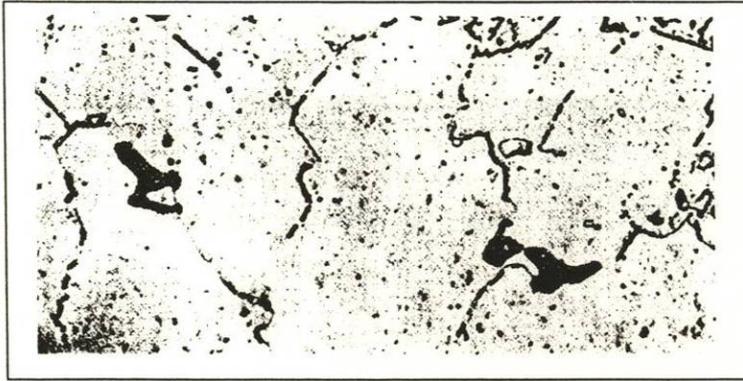


Figura 2.12.- Cavidades de termofluencia que se forman en los límites de grano de un acero inoxidable austenítico (500x). [1]

### 2.3.5 Fractura por esfuerzo asistidas por corrosión.

Las fallas por corrosión y esfuerzo generalmente se identifican mediante un examen de la microestructura del metal adyacente. Normalmente, se observa gran cantidad de ramificaciones de grietas a lo largo de los bordes de grano, figura 2.13. Se puede identificar el lugar donde iniciaron grietas por la presencia de productos de la corrosión.

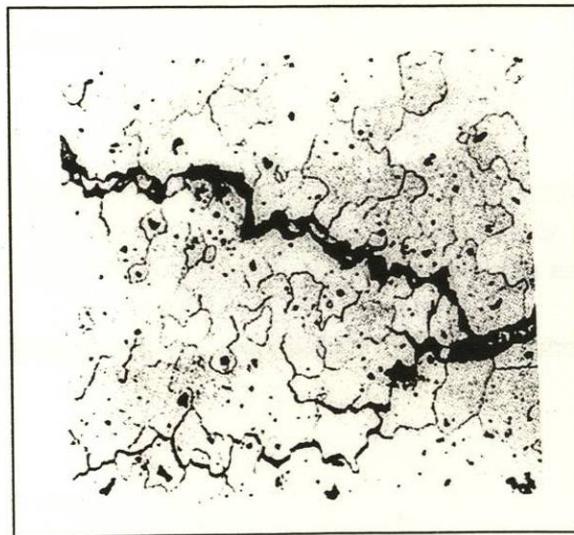


Figura 2.13.- Fotomicrografía del metal cercano a una fractura de corrosión bajo esfuerzo, mostrando las numerosas grietas intergranulares que se forman a causa del proceso de corrosión (200x). [1]

### 2.3.6 Fractura en materiales no metálicos.

En materiales cerámicos, los enlaces iónicos o covalentes permiten poco o nulo deslizamiento, la falla es resultado de una fractura frágil por agrietamiento en planos espaciados y compactos. La superficie de fractura se muestra lisa. En la figura 2.14 se muestran micrografías electrónicas de barrido de superficies de fractura en cerámicos.

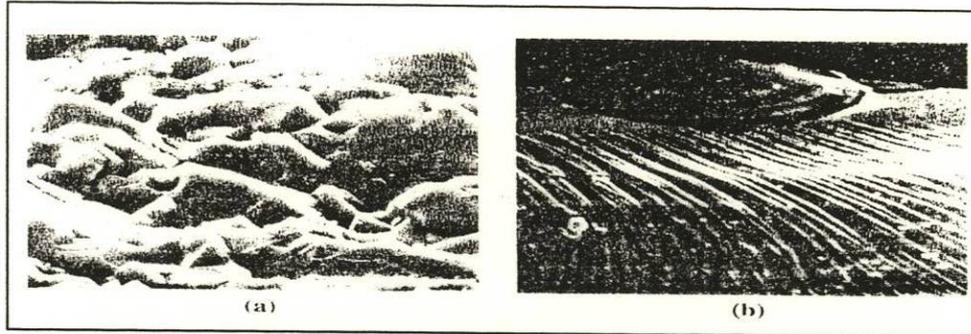


Fig. 2.14.- Micrografías electrónicas de barrido de superficies de fractura en cerámicos.

[a] La superficie de fractura de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mostrando los planos de clivaje [1250 $\times$ ] y [b] La superficie de fractura del vidrio, mostrando la zona especular [arriba] y las líneas de rasgado características de una fractura conchoidal [300 $\times$ ]. [1]

Los vidrios se fracturan de manera frágil al igual que los cerámicos, observándose un tipo de fractura tipo concha. Las líneas de falla apuntan hacia atrás, la zona tipo espejo, y al origen de la grieta, de manera muy similar al patrón de Chevrón en los metales.

Los polímeros pueden fallar ya sea por mecanismo dúctil o por mecanismo frágil.

## 2.4 TIPOS DE FRACTURA.

Estos son determinados de acuerdo a la deformación de la fractura, dependiendo así de la cantidad en deformación plástica previa.

### 2.4.1 Fractura dúctil.

Algunos metales sometidos a un ensayo de tracción presentarán una estricción en la zona central de la probeta para romperse finalmente con valores de reducción de área que pueden

llegar en algunos casos al 100%. Este tipo de fractura se denomina dúctil y es característica de materiales del sistema cúbico de caras centradas (fcc) en estado de alta pureza.

La fractura dúctil ocurre después de una apreciable deformación plástica del cuerpo, entendiéndose que los esfuerzos en una región relativamente grande de la pieza rebasan el esfuerzo de cadencia o límite elástico. Se presenta de manera transgranular en los metales con buena ductilidad y tenacidad.

#### **2.4.2 Fractura frágil.**

Muchos sólidos, particularmente metales cúbicos de cuerpo centrado (bcc) y cristales iónicos, presentan fracturas precedidas por cantidades muy pequeñas en deformación plástica, con una fisura, propagándose rápidamente a lo largo de planos cristalográficos bien definidos, llamados planos de clivaje, que poseen baja energía superficial. Este tipo de fractura se denomina frágil.

Dicha fractura ocurre cuando la deformación de la mayor parte del cuerpo es elástica, de manera que después de la fractura, los fragmentos de la pieza pueden volver a juntarse sin que haya cambios significativos en la geometría. Se presentan en metales con baja ductilidad y tenacidad aunque la mayoría de los metales dúctiles también fallan de manera frágil cuando se les aplica grandes tasas en deformación (como en el ensayo de impacto).

#### **2.4.3 Fractura mixta.**

La inestabilidad plástica puede ser responsable en otros casos de la propagación rápida de una fisura, dando así origen a un fenómeno de fractura dúctil rápida. Hoy se sabe que muchas fallas catastróficas que en el pasado fueron atribuidas a fracturas frágiles, tuvieron su origen como inestabilidades dúctiles. El incremento logrado en las últimas décadas en la resistencia y tenacidad de los materiales, hace que el fenómeno de falla por inestabilidad dúctil sea objeto de especial atención por parte de ingenieros (figura 2.15) e investigadores.

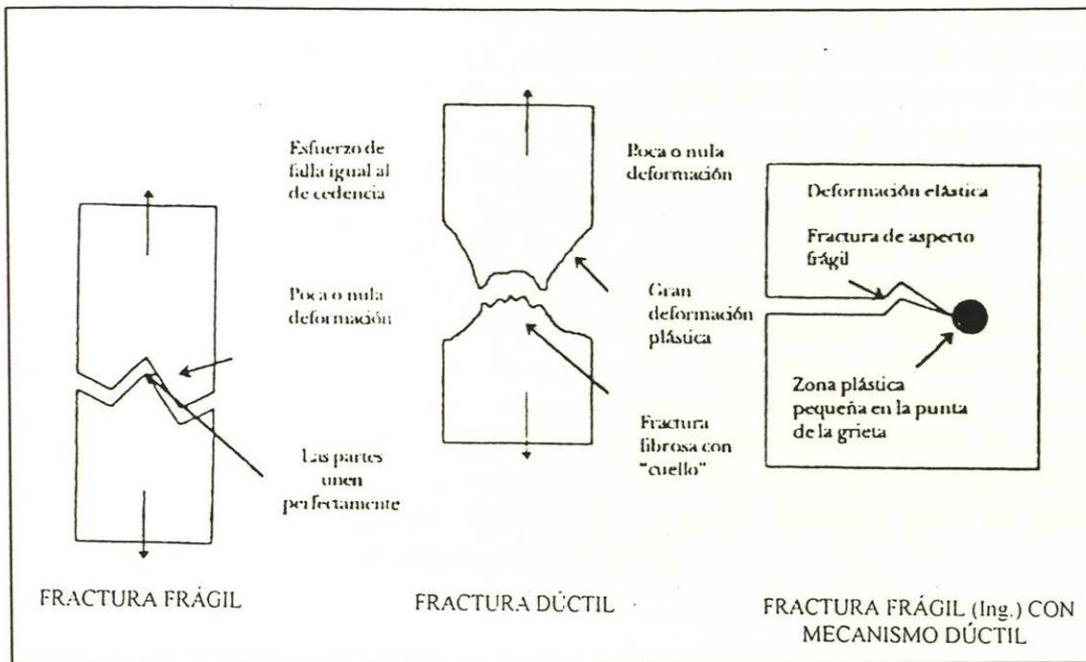


Figura 2.15.- Clasificación de la fractura desde el punto de vista ingenieril. [6]

Bajo ciertas condiciones, un material que ha alcanzado la condición plástica puede inestabilizarse y conducirse rápidamente a un colapso plástico. Un ejemplo conocido de este fenómeno es la estricción que precede a la rotura en el ensayo de tracción de un material dúctil que se ilustra en la figura 2.16.

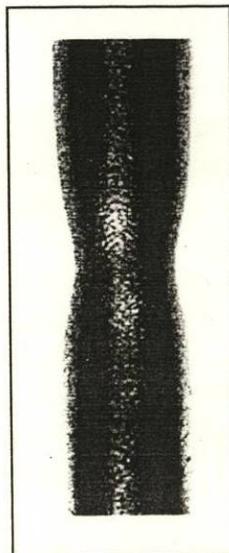


Figura 2.16.- Inicio de la inestabilidad plástica de una probeta durante un ensayo de tracción. [3]

No obstante que la fractura rápida es un fenómeno reconocido desde hace muchos años, existe considerable confusión respecto de la manera de diferenciar entre una fractura rápida dúctil de una fractura frágil. Esto obedece fundamentalmente a que en general se tiende a considerar el proceso global de deformación plástica que conduce al proceso de fractura. Ahora bien, un metal puede fallar por clivaje, que es un proceso de fractura frágil, luego de una deformación macroscópica importante; del mismo modo, es posible tener una deformación plástica global despreciable en un metal que falla de manera dúctil. La confusión se reduce si en lugar de considerar el proceso global de deformación que precede a la fractura, se tiene en cuenta la deformación localizada en el material que rodea el vértice de la fisura durante la propagación de la misma. De este modo, una fractura frágil es aquella en la cual la fisura se propaga con muy poca deformación plástica en su vértice, mientras que una fractura dúctil es aquella que progresa como consecuencia de una intensa deformación plástica asociada al extremo de la fisura. Es obvio que en la práctica no es posible establecer un límite preciso entre ambos tipos de fractura, pero en general es posible diferenciar fácilmente entre uno y otro extremo.

## **2.5 CRITERIO DE GRIFFITH.**

El proceso de fractura de los materiales frágiles fue explicado inicialmente por Griffith (1920) en términos de la existencia de pequeños defectos intrínsecos al material que actúan a modo de amplificadores de esfuerzos. Tales microdefectos se constituyen en un factor determinante que gobierna la resistencia de dichos materiales puesto que son lugares potenciales de iniciación o precursores de grietas. Se ha observado experimentalmente que las imperfecciones pequeñas tienen mucho menor efecto dañino en las propiedades del material que las imperfecciones mayores. Esto fue teóricamente inquietante porque los criterios de la fractura utilizados en ese tiempo, predecían que si las imperfecciones fueran similarmente geométricas, las concentraciones de esfuerzo causadas por las imperfecciones serían las mismas, de manera que el efecto de la resistencia sería el mismo, sin importar el tamaño de la imperfección.

Se dice que la piedra angular sobre la que descansa la Mecánica de Fractura es el llamado Principio de Griffith [2,3,4,6]. Su interés original era sobre el efecto del tratamiento de la superficie en la resistencia de los sólidos.

El principal requisito fundamental para la propagación de una grieta es que los esfuerzos en la grieta deben exceder la fuerza cohesiva teórica del material. Está indicado en los criterios fundamentales, pero no es de mucha ayuda debido que es casi imposible medir el esfuerzo en la punta de la grieta. El criterio de Griffith es de más ayuda y predice la fuerza que debe ser aplicada a un cuerpo que contiene una grieta para la propagación de la misma; dicho criterio está basado en un balance de energía.

Griffith sugirió un procedimiento de equilibrio de energía, en contraste con el procedimiento simplista de resistencia, basado no solamente en el potencial de energía de las cargas externas y de la energía de deformación elástica almacenada, sino también en

otro término de energía: la energía superficial. Esta energía superficial  $\gamma$ , esta asociada con la creación de la superficie nueva durante el proceso de la fractura.

Este dice que para que una fisura se propague en un material, es necesario que la liberación de energía elástica que se produce a medida que la fisura avanza, no sea inferior a la suma de la energía que se requiere para formar las nuevas superficies de fractura que se generan con el avance de la fisura, más la energía necesaria para hacer avanzar la zona plástica que acompaña al vértice de la fisura durante la propagación. Si representamos en un gráfico como varía el trabajo de fractura y la liberación de energía elástica a medida que la fisura se propaga, la diferencia entre ambas adopta la forma de la curva que se observa en la figura 2.17.

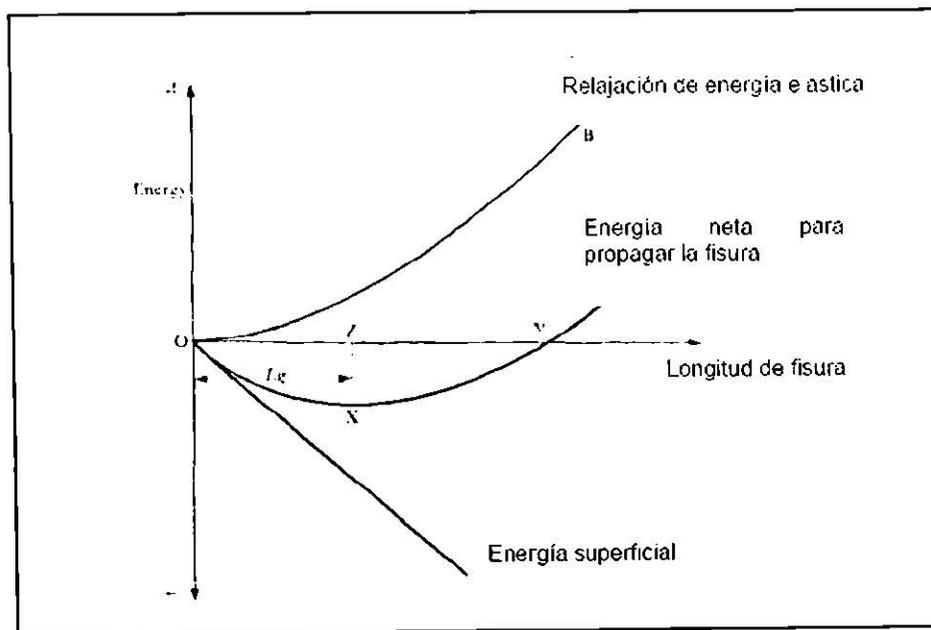


Figura 2.17.- Balance de energías en el proceso de fractura. [3]

Este principio se aplicó a una grieta de longitud  $2a$  en una placa infinita de espesor unitario. La figura 2.18 muestra que cuando la grieta se extiende bajo una carga constante, el cambio de energía potencial de la carga externa debido al crecimiento de la grieta es  $P\Delta x$  y el incremento en la energía de deformación es  $\frac{1}{2} P\Delta x$ . En otras palabras, la disminución en la energía potencial de la carga externa es dos veces el incremento de la energía de la deformación.

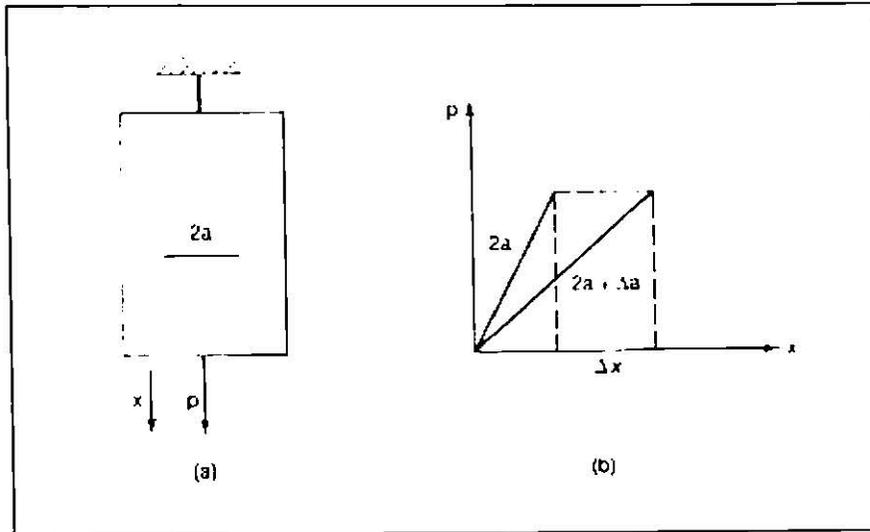


Figura 2.18. - (a) Placa con grieta  $2a$ ; (b) Diagrama de desplazamiento de carga. [2]

Durante la extensión de la grieta hay un incremento de la energía superficial  $4a\gamma$  (recordar que la longitud de la grieta es  $2a$  y que tanto la superficie superior como la inferior de la grieta deberán incluirse). Griffith utilizó un resultado obtenido por Inglis, en que el cambio en energía de deformación debido a una grieta elíptica en una placa uniformemente esforzada es  $\frac{\pi a^2 \sigma^2}{E}$  y por lo tanto, el cambio en energía potencial de la carga externa es  $\frac{2\pi a^2 \sigma^2}{E}$ . El cambio de energía de la placa debido a la introducción de la grieta, es dado por:

$$U_{\text{agrietado}} - U_{\text{sin grietas}} = \frac{2\pi a^2 \sigma^2}{E} + \frac{\pi a^2 \sigma^2}{E} + 4a\gamma \quad (2.3)$$

Minimizando la energía en relación con la longitud de la grieta,

$$\frac{\delta}{\delta a} \left( -\frac{\pi a^2 \sigma^2}{E} + 4a\gamma \right) = 0 \quad (2.4)$$

se obtiene el esfuerzo crítico (para esfuerzo plano):

$$\sigma = \frac{2E\gamma}{\pi a} \quad (2.5)$$

Esta ecuación es importante porque relaciona el tamaño de la imperfección ( $2a$ ), con la resistencia a la tensión del material. Predice que las imperfecciones pequeñas son menos dañinas que las imperfecciones grandes, como se observó experimentalmente. Aunque el trabajo de Griffith fue ignorado por varios años, preparó el camino para la creación y el desarrollo de un campo maduro para la mecánica de la fractura lineal.

Si bien esto era esencialmente correcto, lo que se ignoró fue el hecho que una fisura puede crecer bajo cargas variables con tensiones relativamente bajas y una vez alcanzada la longitud crítica de Griffith, propagarse a alta velocidad a través de la estructura.

### 2.5.1 Mecánica de la fractura elástico-lineal.

Los conceptos de la mecánica de la fractura elástico-lineal [2,4] son aplicables a aquellos materiales que obedecen a la ley de Hooke y cuyo comportamiento global tiene carácter lineal y elástico. Para aquellos la teoría establece una descripción cuantitativa de los fenómenos de falla proporcionando una predicción acerca de la vida útil de las estructuras.

De acuerdo con los principios termodinámicos, cuando un sistema pasa de un estado de desequilibrio a otro de equilibrio, debe existir un decremento en su energía. Basándose en este principio, Griffith establece que una grieta puede formarse o propagarse únicamente si la energía interna del sistema decrece o se mantiene constante. En las condiciones límites por el sistema sea igual o empleada en la formación de las nuevas superficies de fractura creadas por la propia grieta.

Si se considera el caso de una lámina delgada que contiene una grieta elíptica de longitud  $2a$ , y se admite que la anchura de la lámina es mucho mayor que  $2a$ , (figura 2.19) la relación propuesta por Griffith entre el tamaño de defecto y el esfuerzo necesario para propagar una grieta vale:

$$\sigma_r = \left( \frac{2E\gamma_s}{\pi a_0} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

siendo  $\sigma_r$  siendo la tensión de rotura,  $E$  el módulo de Young [1,4],  $a_0$  el tamaño de defecto intrínseco, y  $\gamma_s$  la energía de creación de una unidad de superficie de grieta.

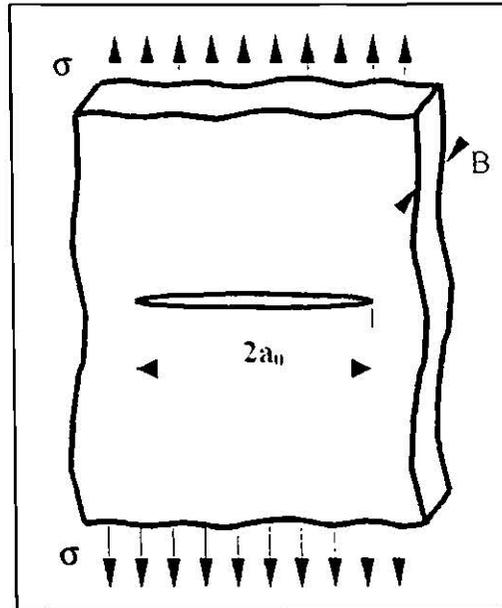


Figura 2.19.- Grieta elíptica pasante en el seno de una lámina delgada semiinfinita sujeta a un esfuerzo tensional remoto. [4]

La extensión de la aproximación a otros casos, por ejemplo para una grieta de tipo esferoidal plana, conduce a ligeras modificaciones de la ecuación anterior:

$$\sigma_r = \left( \frac{\pi \gamma_s E}{2(1-\nu^2) a_0} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

La ecuación 2.6 es válida para sólidos frágiles ideales. La mayoría de los metales y polímeros experimentan alguna deformación plástica antes de la fractura, lo que hace que la punta de la grieta sea menos aguda, lo que aumenta la resistencia a la fractura. Irwin (1948) y Orowan (1948) modificaron la ecuación 2.6 incluyendo un término que representa la energía de deformación plástica asociada a la extensión de grieta:

$$\sigma_r = \left( \frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a_0} \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

siendo  $\gamma_p$  el trabajo plástico por unidad de superficie creada que es normalmente mucho mayor que  $\gamma_s$ . La ecuación 2.8 puede generalizarse para tener en cuenta cualquier tipo de disipación energética:

$$\sigma_r = \left( \frac{2EU_r}{\pi a_0} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

Donde  $U_r$  es la energía de fractura del material.

Se han desarrollado dos criterios diferentes para el análisis de la propagación de grietas en cuerpos lineales y elásticos, ambos son diferentes en su concepción aunque se encuentran relacionados.

Por un lado el criterio basado en el campo de intensidad de esfuerzos existente en la vecindad de la punta de la grieta o criterio de intensidad de esfuerzos ( $K_c$ ), y por otro lado el criterio energético basado en la medida de la energía disponible en el cuerpo para incrementar la extensión de la grieta conocida por tasa crítica de liberación de energía ( $G_c$ ) o por fuerza de extensión de grieta.

## CAPÍTULO 3

### FRACTOGRAFÍA Y FRACTOMETRÍA AUTOAFÍN

#### 3.1 INTRODUCCIÓN.

El objetivo del presente apartado es discutir brevemente algunos aspectos de la fractografía y del análisis de fallas. Se describen las principales características de las superficies de fractura dúctil, frágil e intergranular, tal como se observan en un microscopio electrónico de barrido. Se analiza también la contribución de la fractografía electrónica al estudio de superficies de fatiga. Las micrografías electrónicas de barrido permiten observar las superficies de fractura a altas magnificaciones, son actualmente disponibles en todo laboratorio de materiales, y constituyen una herramienta muy valiosa para científicos e ingenieros de la ciencia de los materiales.

En este capítulo se realiza una recopilación de la Geometría de Fractales, así como también conceptos fundamentales de esta ciencia tales como: dimensión fractal, autosimilitud, autoafinidad y escalamiento.

Se aborda también un tema importante que nos permite comprobar prácticamente los cambios y propiedades con que cuentan diferentes tipos de materiales: la Fractometría. En este subcapítulo se exponen los diversos tipos de instrumentos y herramientas que nos ayudaran a observar de manera macroscópica y microscópica la gran variedad de materiales existentes.

#### 3.2 FRACTOGRAFÍA.

Las técnicas fractográficas pueden aportar información sobre la fractoténacidad del material del componente fracturado. La fragilidad o ductilidad del material quedan en general reveladas en la superficie de fractura. Una aleación más bien dúctil presenta una superficie de fractura con las cavidades características, pero un material más bien frágil se rompe preferentemente por un mecanismo de clivaje transgranular. En el caso general estos modos de fractura aparecen mezclados, pero la proporción relativa de los distintos tipos es indicativa de las propiedades fractomecánicas del material. Una observación fractográfica también permite estimar cualitativamente la magnitud de las tensiones actuantes. Por ejemplo, una pequeña zona de fatiga en el inicio de la rotura y una extendida zona de fractura final rápida indica grandes tensiones de trabajo. Inversamente, una zona extendida de propagación por fatiga y una pequeña zona de rotura final indican tensiones más bien bajas.

También, la fractura de un componente puede estar muy relacionada con el medio químico activo al cual estuvo expuesto durante el servicio. En un proceso de iniciación de rotura por corrosión, la superficie contiene partículas que se observan claramente en una micrografía

electrónica. Eventualmente la composición de estas partículas puede determinarse por técnicas de microanálisis dispersivo en energía (EDS-EDAX) [7]. La densidad de los productos de corrosión también puede indicar el sentido de propagación de la rotura, puesto que es mayor en las zonas cercanas al origen, expuestas durante más tiempo a la acción del medio corrosivo.

### 3.2.1 Geometría de fractales.

Recientemente nació una ciencia que permite describir con una mayor precisión la naturaleza: La Geometría de Fractales [8,9], ciencia perteneciente a las matemáticas y uno de cuyos fines es la descripción de las formas que toma lo material. Los fractales, son objetos geométricos con dimensiones que pueden ser fraccionarias, el término proveniente del latín “fractus” que corresponde al verbo “frangere” cuyo significado es “romper, crear fragmentos irregulares”. La expresión, así como el concepto, se atribuyen al matemático Benoit B. Mandelbrot [9,10,11,12,13], y aparece como tal a finales de la década de los setenta y principios de los ochenta.

La primera definición establecida por Mandelbrot en 1975 es:

Fractales es el conjunto de formas generadas normalmente por procesos matemáticos repetitivos y que se caracterizan por: 1) Tener el mismo aspecto a cualquier escala de observación, 2) Tener longitud infinita, 3) No ser diferenciables y 4) Tener dimensión fraccional o fractal.

Un fractal es un objeto geométrico compuesto de elementos de tamaño y orientación variable, pero de aspecto similar. Características de estos objetos es que son rugosos, porosos o fragmentados e irregulares, pero lo más interesante es que poseen estas propiedades al mismo grado en todas las escalas, es decir, que presentan la misma forma si son vistas de lejos o de cerca.

La Geometría Fractal se describe por medio de algoritmos, permite dimensiones fraccionarias y es adecuada para describir formas naturales.

Un fractal es un subconjunto de un espacio métrico para el cual su dimensión de Hausdorff - Besicovitch,  $D_{H-B}$  (no restringida a tomar valores enteros) es estrictamente mayor a su dimensión topológica,  $D_T$ .

Se puede decir que los fractales poseen algún tipo de autosimilitud o que están formados por partes pequeñas que se parecen al todo. Dicha similitud puede ser geoméricamente estricta o solamente aproximada o estadística.

Un fractal natural está formado por copias, llamadas ramas; que a su vez, contienen copias de si mismas, las sub-ramas. Ejemplos dados podrán observarse en el Conjunto de Cantor (figura 3.1) y la Curva de Von Koch (figura 3.2).

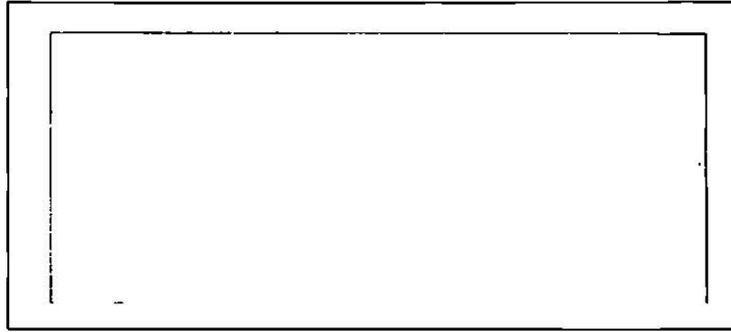


Figura 3.1.- El conjunto de Cantor, con dimensión fractal = 0.6319. [9]

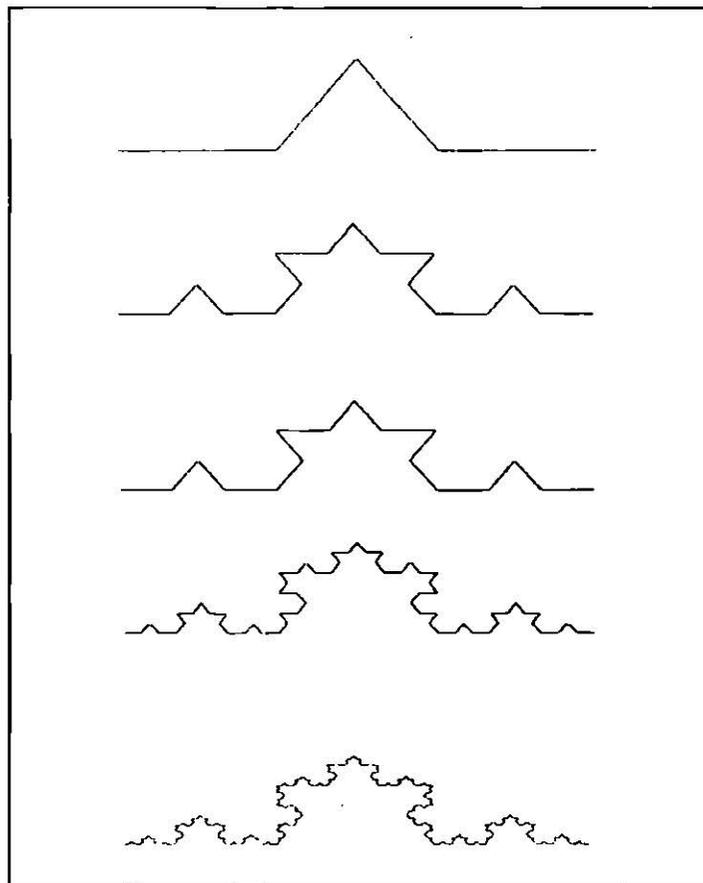


Figura 3.2.- Construcción de la curva de von Koch. Su dimensión fractal es de 1.2618. [9]

En el corto tiempo transcurrido desde que Mandelbrot formuló la definición de fractal, es asombrosa la cantidad y la rapidez con que científicos han elaborado modelos para describir y para comprender cómo la naturaleza crea sus formas, y cómo el crecimiento en la naturaleza está vinculado a modelos fractales. Tal parece que la naturaleza sintiera predilección por la estética fractal.

### 3.2.2 Dimensión fractal: El concepto.

La dimensión fractal ( $D_f$ ) [9,11], que es una propiedad del objeto la cual nos indica qué tanto ocupa el espacio que lo contiene, y que puede adquirir valores continuos en el espacio de los números reales.

### 3.2.3 Autosimilitud, autoafinidad y escalamiento.

Objetos naturales o matemáticos, tales como las superficies de los objetos (figura 3.3) y los perfiles generados por el movimiento browniano (figura 3.4), solo mantienen su aspecto durante el escalamiento si este hace diferente en al menos una de las direcciones, es decir son fractales anisotrópicos, los cuales se conocen como objetos autoafines [6,12,13,14].

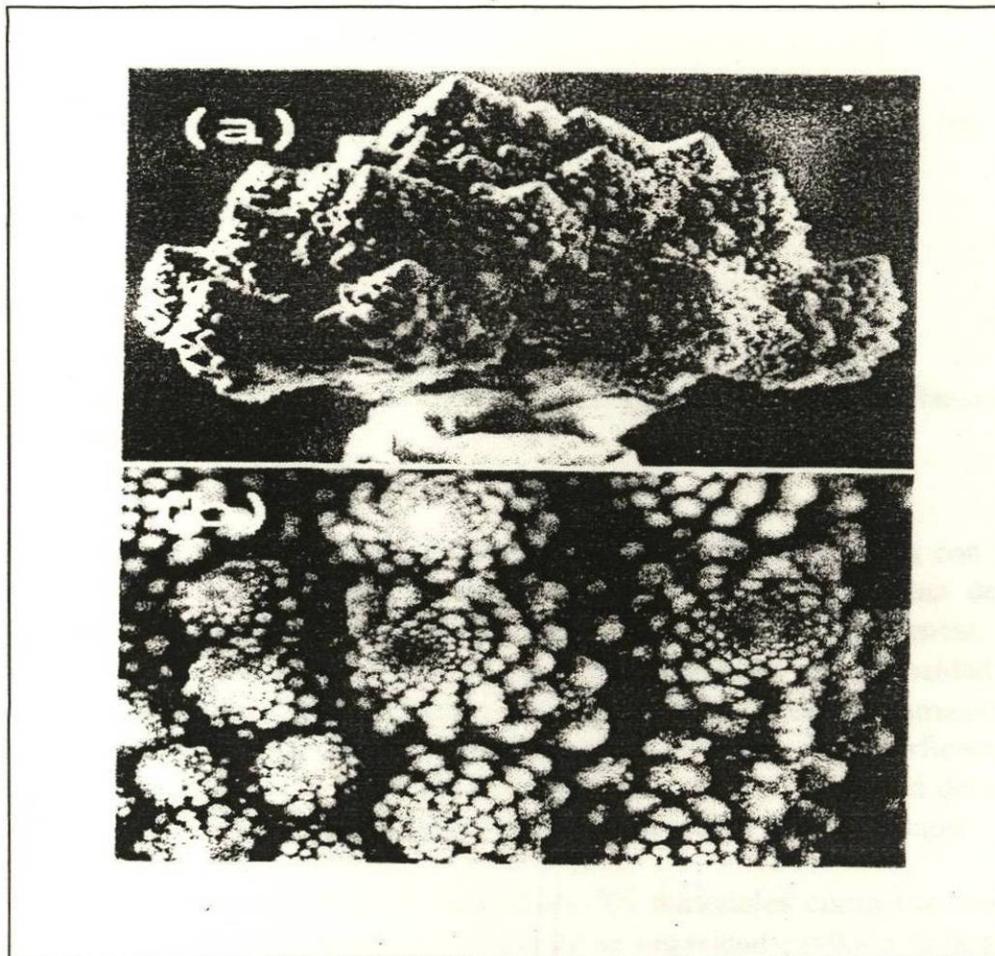


Figura3.3.- Brócoli de Bruselas. (a) Mostrando la característica autosimilar al repetirse el aspecto de la planta original, (b) Al ser ampliada una sección de la misma. [12]

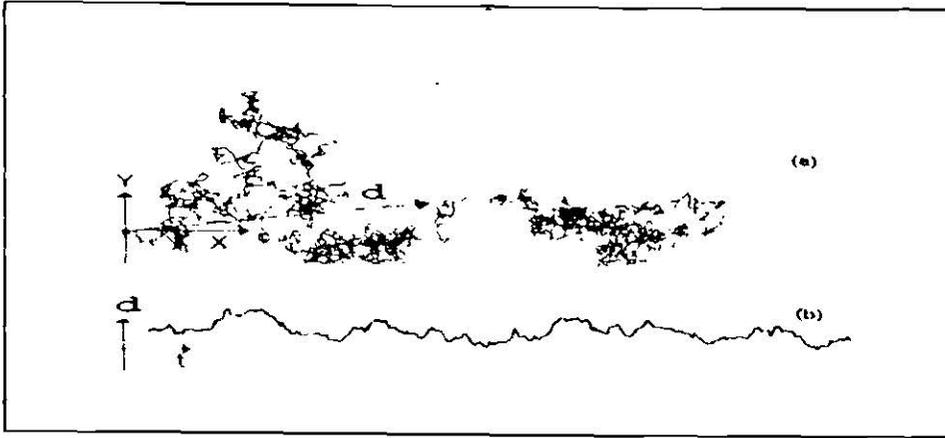


Figura 3.4.- Movimiento browniano esquematizado como [a] La posición X,Y en función del tiempo y [b] La distancia al origen en función del tiempo. [12]

Esta propiedad de autoafinidad, obedece las transformaciones o escalamientos como las que se describen en la siguiente ecuación:

$$(X, Y, Z) \rightarrow (\lambda_x X, \lambda_y Y, \lambda_z^\zeta Z) \quad (2.10)$$

Donde  $\lambda_x = \lambda_y \neq \lambda_z^\zeta$

Al exponente  $\zeta$  se conoce como exponente de autoafinidad, también se le llama exponente de rugosidad o de Hurst.

Las superficies autoafines se observan como fluctuaciones perpendiculares con respecto a un plano de referencia. Dichas fluctuaciones de alturas, a través de una determinada longitud de escala ( $r$ ) cuya dirección es paralela al plano de referencia, presentan propiedades de escalamiento caracterizadas por un exponente de rugosidad ( $\zeta$ ) cuya magnitud se encuentra entre 0 y 1. Cuando  $\zeta=1$  la superficie es completamente lisa. Si  $\zeta$  disminuye, la rugosidad aumenta. El comportamiento autoafín en superficies reales se presenta hasta una determinada longitud en la escala denominada longitud de correlación ( $\zeta$ ). Por encima de dicho parámetro las superficies se consideran objetos planos.

Las superficies de fractura son objetos autoafines. En materiales como los metales y los cerámicos dichas superficies exhiben un exponente de rugosidad  $\zeta \approx 0.8$  a lo largo de 2 o 3 décadas en la longitud de escalas, lo cual permitió establecer la conjetura de universalidad para dicho exponente, independientemente del tipo de material y del modo de fractura. Este régimen de autoafinidad se encuentra bajo condiciones de propagación de grieta muy elevada (no controlada) y/o a longitudes en la escala del orden de los micrómetros.

Al analizar las superficies de fractura de los materiales plásticos en condiciones de fractura no controlada, se concluyó que estas presentan un comportamiento autoafín como el que se ha reportado para materiales metálicos y cerámicos bajo condiciones de propagación de grieta no controlada, refuerzan con esto la conjetura de universalidad del exponente de rugosidad para superficies de fractura independientemente del tipo material.

Actualmente se encuentra bien establecido que las superficies de fractura son objetos fractales naturales anisotrópicos, objetos autoafines caracterizados por el exponente de rugosidad  $\zeta$ .

La aplicación de conceptos de la geometría de fractales al análisis de perfiles rugosos permite demostrar que los diferentes momentos estadísticos de la distribución de alturas de ciertos perfiles dependen del tamaño de muestras  $L$  y siguen un comportamiento proporcional a  $L^H$  (Ley de Potencia). El exponente  $H$  es conocido como el exponente de Hurst o exponente de rugosidad [9,10,13,14,15,16], está relacionado a la dimensión fractal y caracteriza o cuantifica la irregularidad del perfil. Los perfiles que cumplen con tal relación se dice que son autoafines.

A medida que  $H$  aumenta los perfiles lucen más “lisos”, una línea completamente lisa o recta posee un valor  $H$  de 1. Los objetos más lisos muestran gran irregularidad si son analizados a escala suficientemente pequeña.

A mayor irregularidad, mayor es la dimensión fractal. Si se extrae un perfil de alturas de una superficie fractal, éste tendrá una dimensión entre 1 y 2.

En la práctica se ha calculado el llamado exponente de Hurst también llamado exponente de rugosidad, que está relacionado a la dimensión fractal mediante la relación:

$$\zeta = 2 - D \quad (2.11)$$

Donde  $\zeta$  es el exponente de rugosidad y  $D$  es la dimensión fractal del perfil. Una superficie plana tiene  $D = 2$  y  $\zeta = 0$ ; una típica superficie de fractura muestra  $D = 1.2$  y  $\zeta = 0.8$ .

Uno de los métodos para calcular  $\zeta$ , más confiables es el método de ventanas de ancho variable. El perfil se divide en franjas o ventanas de tamaño  $r$ , se calcula para cada ventana la cantidad  $Z_{\max}$ , que es la diferencia entre la máxima y la mínima altura; promediando para todas las ventanas posibles. Variando el tamaño de las ventanas se obtiene la distribución  $Z_{\max}(r)$ . Para un perfil autoafín se cumple la siguiente ley de potencia:

$$Z_{\max}(r) \propto r^{-\zeta} \quad (2.12)$$

Un gráfico log-log de  $Z_{max}(r)$  Vs.  $r$  permite verificar la validez de esta ley; si la relación se cumple, el perfil es autoafín y el exponente  $\zeta$  viene dado por la pendiente de la línea recta en el régimen autoafín.

Las superficies de fractura son autoafines para longitudes de escala menores a la llamada longitud de correlación [10,13,14], más allá de la cual la superficie puede considerarse un objeto euclidiano plano. Dicha longitud de correlación puede determinarse también del gráfico de  $Z_{max}(r)$  Vs.  $r$ .

Existe abundante evidencia acumulada en los últimos años que apoya la idea propuesta por Bouchaud, de que existe un régimen de autoafinidad común a muchos materiales, como un valor universal  $\zeta=0.8$  válido para velocidades de propagación de grietas altas y longitudes de escala de análisis relativamente grandes. Para velocidad de propagación suficientemente lento y/o escalas de observación suficientemente pequeñas, se observa otro régimen de autoafinidad, con exponente de rugosidad  $\zeta \approx 0.5$ . Cuando se presentan las condiciones cinéticas adecuadas, pueden observarse ambos regímenes en la misma superficie de fractura, separados en una cierta longitud de quiebre  $\xi_c$ , misma que parece estar estrechamente ligada a la microestructura del material.

Se llega a pensar que la longitud de correlación se encuentra ligada directamente con el tamaño de las heterogeneidades, ya que estas heterogeneidades al interactuar con el frente de grieta hacen que la superficie que se genera presente un carácter de planicidad. Este pensamiento intuitivo se confirma al cotejar el valor máximo del diámetro de Feret de las heterogeneidades contra la longitud de correlación, concluyendo que el valor de las heterogeneidades de mayor tamaño, corresponde a la longitud límite del comportamiento autoafín.

### **3.3 FRACTOMETRÍA: INSTRUMENTOS Y HERRAMIENTAS.**

En la mayoría de los casos las técnicas fractométricas aportan una valiosa información sobre las causas de una rotura, pero deben utilizarse otros métodos de análisis para completar un análisis de falla que permita un adecuado reemplazo del componente. Las técnicas fractométricas electrónicas comenzaron a utilizarse poco después del desarrollo de los primeros microscopios electrónicos por transmisión (1933-1940). Dado que en este tipo de microscopios solamente era posible observar imágenes electrónicas de láminas muy delgadas, las primeras observaciones de rasgos topográficos superficiales necesitaban de la preparación previa de réplicas de carbono de la superficie analizada. Estas réplicas reproducían en las variaciones de su espesor la topografía de la superficie de fractura. A pesar de algunas dificultades experimentales que presenta el proceso de preparación de buenas réplicas, éstas presentan todavía algunas ventajas. Por un lado, las réplicas son fácilmente transportables, y por otro lado, permiten el estudio de superficies de grandes componentes.

Pero desde la década de 1960, fue el desarrollo del microscopio electrónico de barrido [5,6,8,10,13,14,16] el que permitió la observación directa de las superficies de fractura con resoluciones de unos 10 nm. Los microscopios de barrido modernos ya permiten obtener altas resoluciones y presentan además una amplia profundidad de foco, una característica privativa de este tipo de instrumento es que permite la obtención de micrografías “en foco” de superficies, con resoluciones mejores que unos 4 nm, y la observación tanto de grandes zonas a aumentos tan bajos como 10  $x$ , como el análisis inmediato de zonas previamente seleccionadas hasta aumentos de unos 50000  $x$ .

### **3.3.1 Topometría: Rugosidad de superficies.**

La topografía [14] se ocupa de la descripción del conjunto de particularidades geométricas naturales o artificiales que caracterizan a una superficie. En topografía para describir la irregularidad de las superficies se utiliza la rugosidad.

En algunos casos se busca que la superficie del producto terminado presente un mínimo de rugosidad, ya que esto le da brillo, mejor apariencia y disminuye la fricción de la superficie al estar en contacto con otra, reduciendo el fenómeno de desgaste y la corrosión o erosión de dichos materiales.

#### **3.3.1.1 Técnicas y métodos para medir la rugosidad.**

El método mas usado en la industria para cuantificar la rugosidad se basa en el registro de perfiles de alturas mediante un rugosímetro o perfilómetro [6,15]. El tratamiento estadístico de los datos permite determinar parámetros como la rugosidad rms ( $R_{rms}$ ) y la rugosidad promedio ( $R_a$ ).

##### **3.3.1.1.1 El perfilómetro.**

El principio de operación de este equipo es simple: una fina punta en contacto con la superficie a analizar realiza un barrido controlado en línea recta y las variaciones de alturas se convierten en señales eléctricas y se registran o grafican, en la figura 3.5 se ilustra este principio.



### 3.3.1.1.3 Parámetros de rugosidad.

Los parámetros de rugosidad [15] más usados en ingeniería son la rugosidad promedio ( $R_a$ ), y la rugosidad rms ( $R_{rms}$ ). Es el promedio aritmético de los valores absolutos de las alturas  $y(x)$  medidas a partir de la línea central, figura 3.6.

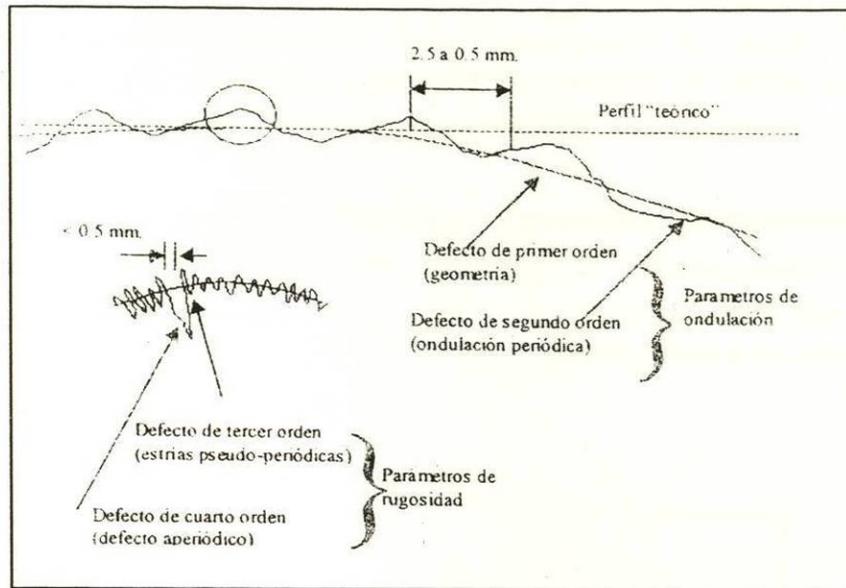


Figura 3.6.- Los cuatro primeros órdenes de defectos topográficos en una superficie con curvatura y ondulación. [15]

Matemáticamente  $R_a$  se define como:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (2.13)$$

Donde L es la longitud de muestreo.

A su vez  $R_{rms}$  se define como:

$$R_{rms} = \left( \frac{1}{L} \int_0^L [y(x)]^2 dx \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

$R_{rms}$  representa el promedio de las desviaciones cuadráticas respecto a la altura media, es la desviación estándar de la distribución estadística de alturas, que a su vez es la raíz cuadrada de la varianza o segundo momento respecto a la media.

Otra medida de la rugosidad que se emplea mucho en trabajos de investigación de topometría es el rango,  $R_z$ , o diferencia máxima de alturas en la longitud de muestreo.

El usuario de un rugosímetro puede percatarse de que desafortunadamente la rugosidad reportada por los parámetros discutidos depende fuertemente del tamaño del muestreo, en general se encuentra que a mayores longitudes de muestreo se detecta mayor rugosidad.

$R_a$  y  $R_{rms}$  no pueden considerarse como propiedades de una superficie.

En la figura 3.7 se muestran los parámetros de rugosidad aquí discutidos y se incluyen además los parámetros  $R_z$  o “altura de diez puntos”, y la “altura de ondulación”,  $W$ .  $R_z$  es la distancia promedio entre los cinco picos más altos y los cinco valles más profundos en la longitud de muestreo. La altura de ondulación tiene una definición aún más rebuscada.

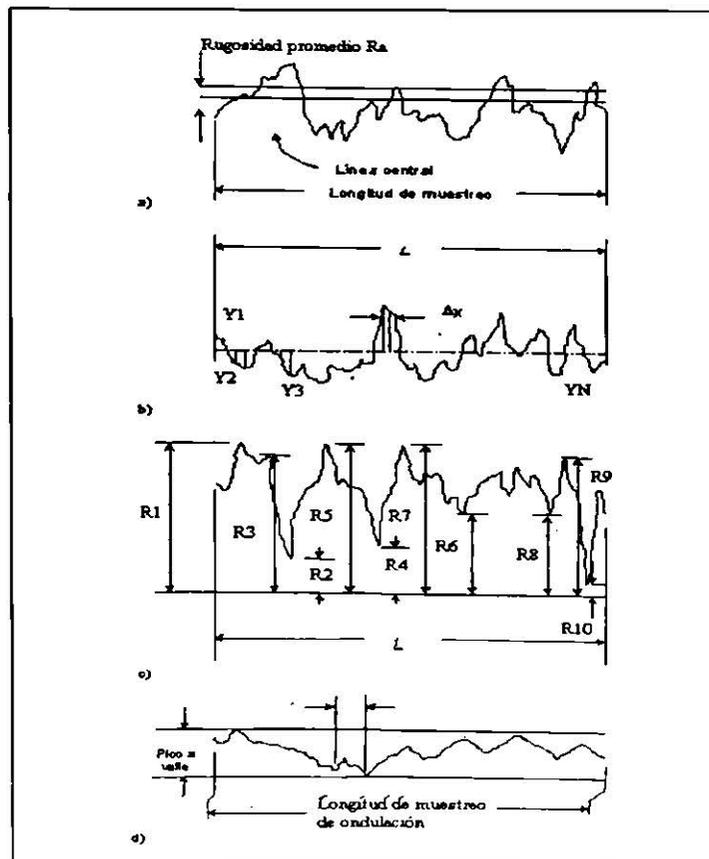


Figura 3.7.- Designación de algunos parámetros de rugosidad. [15]

### 3.3.2 Microscopía de fuerza atómica (MFA).

El MFA se fundamenta en la medida de fuerzas repulsivas o atractivas entre una punta y la muestra. MFA es una técnica basada para la construcción de imágenes digitales a partir de la medición de las fuerzas de atracción y de repulsión entre los átomos de una punta y los de la superficie a analizar. En la figura 3.8 podemos observar el diagrama esquemático del MFA.

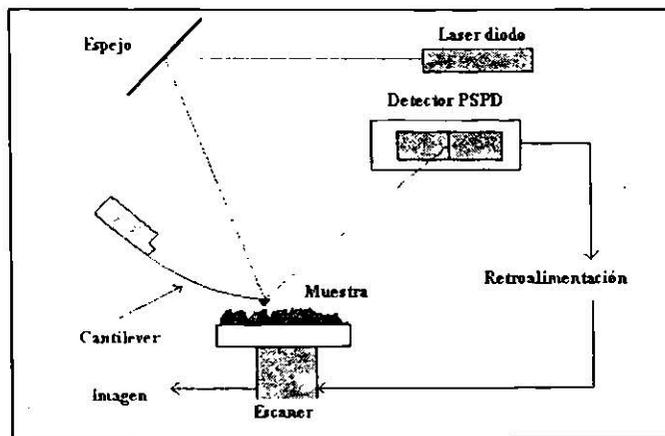


Figura 3.8.- Diagrama esquemático del MFA. [17]

La punta se monta sobre una punta flexible o cantilever, cuya geometría y propiedades del material de construcción hacen posible que sea sensible a las fuerzas interatómicas ( $10^{-9}$  -  $10^{-7}$  N).

La interacción entre la punta y la muestra da como resultado la presencia de fuerzas de Van der Waals y fuerzas de capilaridad atractivas, estas últimas son asociadas a la presencia de capas de líquido sobre la superficie. A medida que la punta se aproxima a la muestra, las fuerzas de Van der Waals eventualmente se van haciendo repulsivas.

Cuando la punta “está en contacto” con la muestra y en ausencia de capas de líquido sobre la superficie, las fuerzas repulsivas dominan el sistema, ejerciendo una fuerza total neta positiva sobre el cantilever como se observa en la figura 3.9.

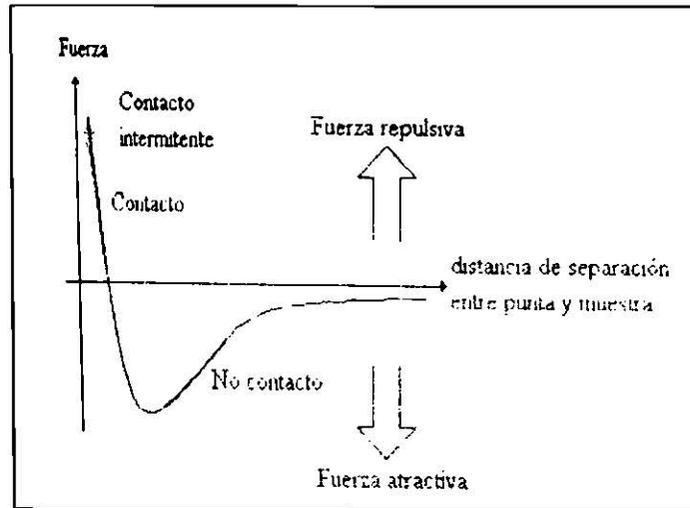


Figura 3.9.- Gráfico de fuerza Vs. distancia entre la muestra y la punta del MFA. [8]

De acuerdo con la distancia de separación entre la muestra y la punta será el tipo de fuerza presente, debido a esto, el MFA puede ser operado de dos maneras fundamentales. La modalidad de contacto (C-MFA) y la modalidad de no contacto (NC-MFA) [15]. Existe una tercera, que es el resultado de una modificación de esta última, conocida como modo intermitente (I-MFA).

En la actualidad existen más modalidades de operación que se han desarrollado para un mejor análisis superficial, entre las cuales tenemos, el modo de fuerza lateral, el modo de fuerza magnética y también metodologías desarrolladas para casos muy específicos de análisis, principalmente en el área de bio-materiales, materiales semiconductores y catalizadores.

# CAPÍTULO 4

## EXPERIMENTACIÓN

### 4.1 INTRODUCCIÓN.

La estrategia experimental desplegada para el logro de los objetivos planteados en este trabajo consistió, en síntesis, en la elaboración de probetas de concreto, su caracterización, la generación de superficies de fractura, el análisis fractográfico y finalmente el análisis autoafín.

### 4.2 MATERIAL UTILIZADO.

Los materiales que se utilizaron para la elaboración de las probetas de concreto fueron cemento Pórtland, agua, agregados gruesos (grava) y agregados finos (arena). El procedimiento para la elaboración de las probetas fue desarrollado en base a la norma ASTM C-192, de acuerdo a la cual el concreto debe tener una adecuada relación agua/cemento para que el material adquiera una buena resistencia y debe realizarse un análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos.

La relación agua/cemento se realizó a proporción de 0.75 (75%). El análisis granulométrico se realizó para una cantidad de mezcla de 20 Lt, con 9.895 Kg. de grava en total y 28.610 Kg. de arena, como se muestra en las tablas 4.1 y 4.2, respectivamente.

**Tabla 4.1.- Tamaño y proporción de los agregados gruesos.**

GRAVA	
TAMAÑO	CANTIDAD (kg.)
$\frac{3}{4}$ "	0
$\frac{1}{2}$ "	1.099
$\frac{3}{8}$ "	8.796
<b>TOTAL</b>	<b>9.895</b>

**Tabla 4.2.- Tipo y proporción de los agregados finos.**

<b>ARENA</b>	
<b>MALLA No.</b>	<b>CANTIDAD (kg.)</b>
4	10.858
8	2.338
16	3.826
30	4.239
50	4.239
100	2.174
100	0.936
<b>TOTAL</b>	<b>28.610</b>

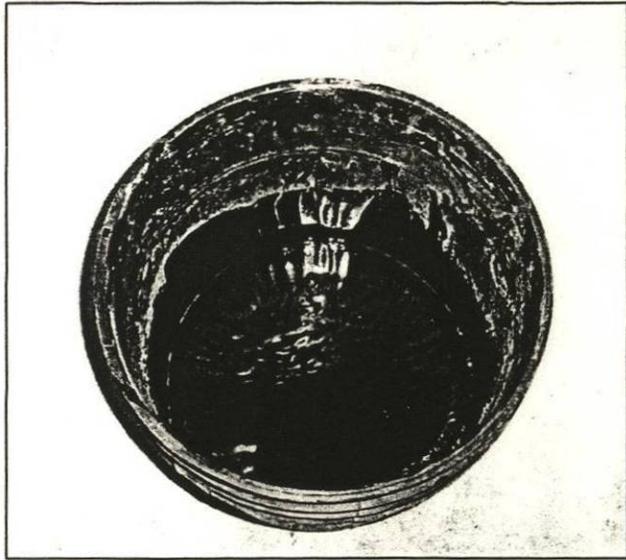
Inicialmente se elaboraron 9 probetas preliminares con las cantidades indicadas en las tablas 4.1 y 4.2 obteniéndose excesiva porosidad en las muestras, por lo que se realizó una corrección en los agregados finos sumándole a estos 2.500 kg. más (ver tabla 4.3).

**Tabla 4.3.- Tipo y proporción de la corrección en los agregados finos.**

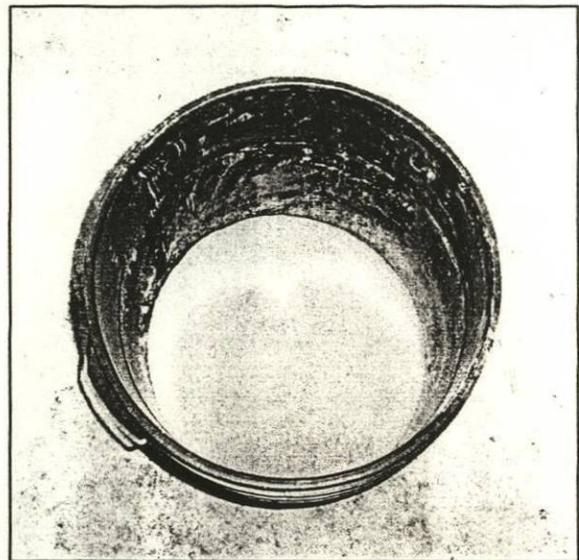
<b>ARENA</b>	
<b>MALLA NO.</b>	<b>CANTIDAD (kg.)</b>
4	0.062
8	0.188
16	0.562
30	0.625
50	0.625
100	0.313
100	0.125
<b>TOTAL</b>	<b>2.5000</b>

### **4.3 ELABORACIÓN DE PROBETAS.**

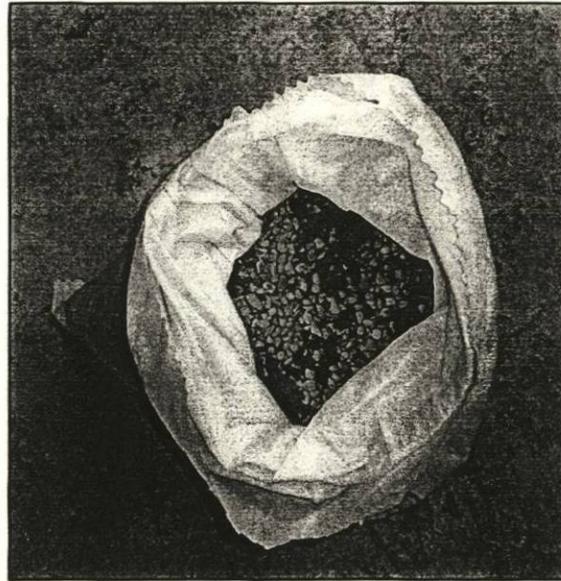
Una vez obtenidas las cantidades correctas de los agregados finos y gruesos, al igual que la relación agua/cemento, se procedió a la elaboración de las probetas. Se colocaron en diferentes recipientes el agua y el cemento Pórtland, los agregados se mezclan y se tienen en un costal, figura 4.1. Todos estos materiales se mezclan por medio de una revoladora de laboratorio, figura 4.2.



a



b



c

Figura 4.1.- (a) Recipiente con el agua para la mezcla, (b) Recipiente con el cemento Pórtland y (c) Mezcla de agregados finos y gruesos.



Figura 4.2.- Revolvedora de laboratorio utilizada para mezclar los materiales empleados para fabricar el concreto.

Se elaboraron 3 moldes, cada uno con 3 divisiones para obtener 9 probetas por lote. Los moldes fueron diseñados de forma rectangular, con dimensiones de 7.6 cm. de ancho, peralte de 7.5 cm. y una longitud del claro de 24 cm. Antes de obtener la mezcla total de los materiales, previamente se lubrican los moldes con aceite para evitar que esta se adhiera a ellos (figura 4.3). Ya preparada la mezcla, se vacía en los moldes (figura 4.4).

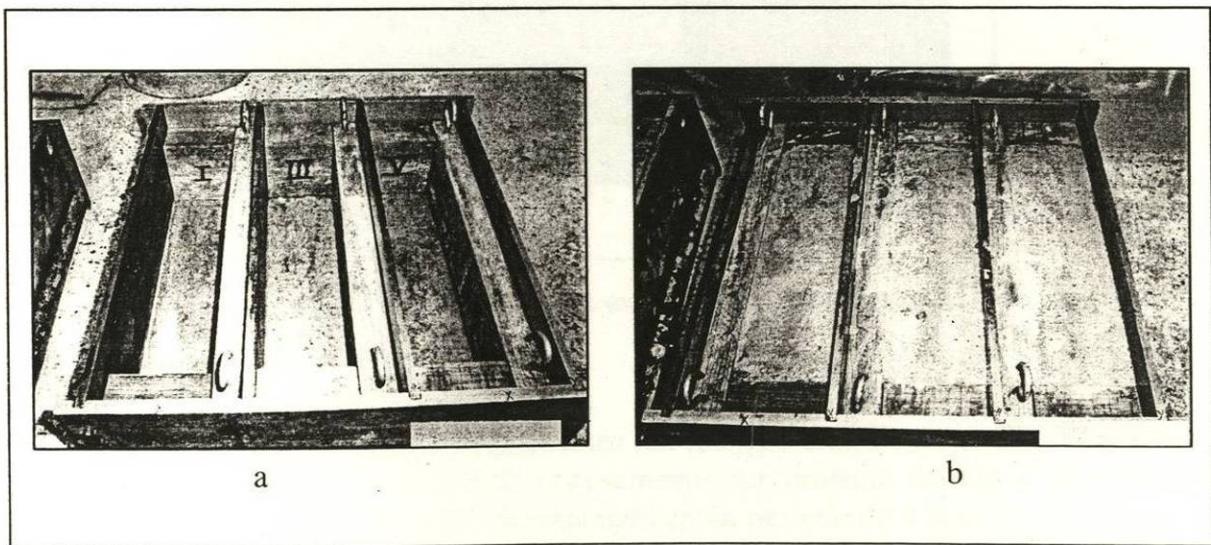


Figura 4.3.- (a) Se muestran los moldes rectangulares que se ocuparon para las probetas, (b) La mezcla vaciada a los moldes.

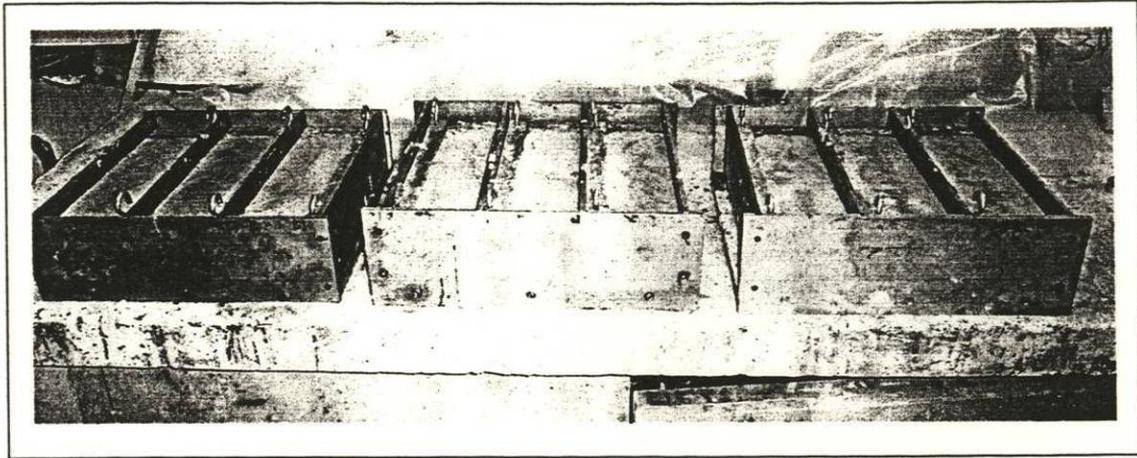


Figura 4.4.-Se observan las 9 probetas respectivamente en sus moldes.

Se dejaron 24 horas las probetas en estado líquido para que en ese tiempo logran endurecerse; posteriormente fueron colocadas en un cuarto de curado cuya temperatura y humedad se encuentran controladas para que estas alcancen su máxima resistencia al cabo de 28 días. Transcurrido el tiempo se retiran las probetas de los moldes para proceder a las pruebas mecánicas y caracterización, figura 4.5.

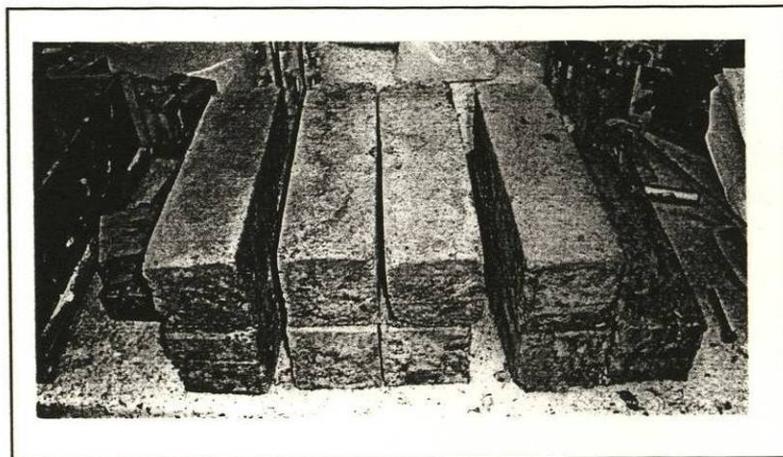


Figura 4.5.- Probetas ya extraídas de sus moldes.

En total se elaboraron 36 probetas en tres lotes (un lote por día), de las cuales 27 resultaron con su calidad, calidad y porosidad exitosamente comprobada debido a la corrección hecha en los agregados finos, todo esto elaborado en un período de 4 días.

#### 4.4 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS.

La caracterización de las propiedades mecánicas se realizó mediante ensayos de compresión y flexión, como se describe a continuación.

##### 4.4.1 Ensayo de flexión.

Se llevó a cabo la fractura de 24 probetas a través del ensayo de flexión bajo la norma ASTM C78-02, con la probeta cargada en los puntos tercios, esto consiste en que a cada tercio de la luz se aplica la mitad de la carga (figura 4.6).

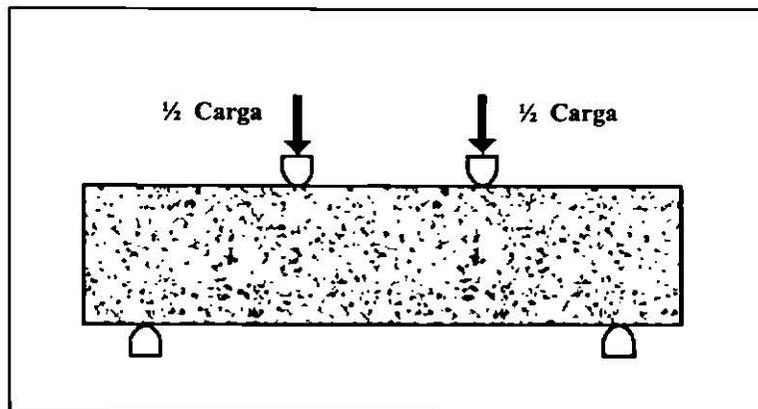


Figura 4.6.- Prueba de flexión con la mitad de la carga aplicada en cada tercio de luz. [18]

El ensayo se llevó a cabo en una máquina universal de ensayos mecánicos transcurridos los 28 días de curado necesarios para que las pruebas obtuvieran su máxima resistencia (figura 4.7).

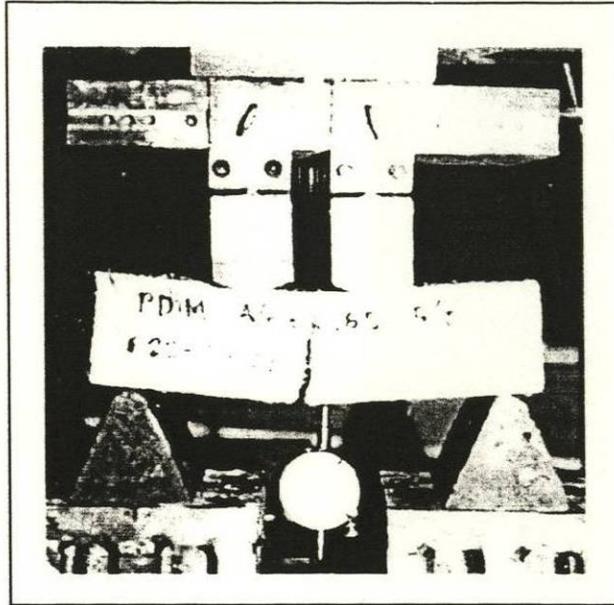


Figura 4.7.- Ensayo de flexión realizado a las barras de concreto. [19]

A partir de los resultados se determinó el módulo de Weibull y el módulo de ruptura (ver apéndice 2).

#### 4.4.2 Resistencia a la compresión.

Se realizó esta prueba a 3 probetas, una de cada lote, la geometría de las probetas se muestra en la figura 4.8. Esta prueba se realizó una vez transcurrido el tiempo de curado en una máquina universal para comprobar que el concreto utilizado alcanzó la resistencia moderada prevista(figura 4.9).

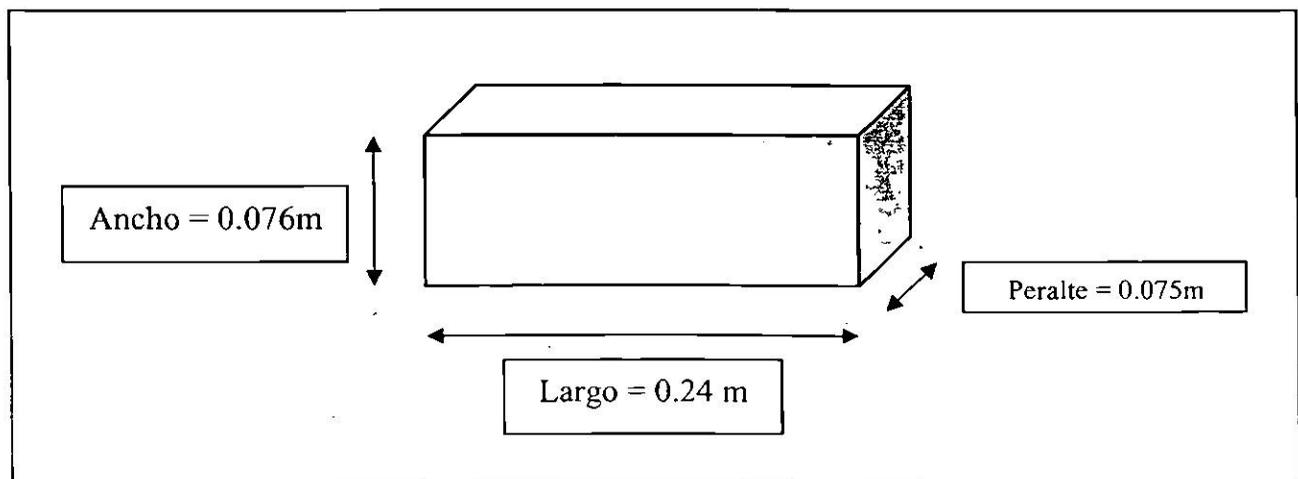


Figura 4.8.- Geometría de la probeta utilizada para la resistencia a la compresión.

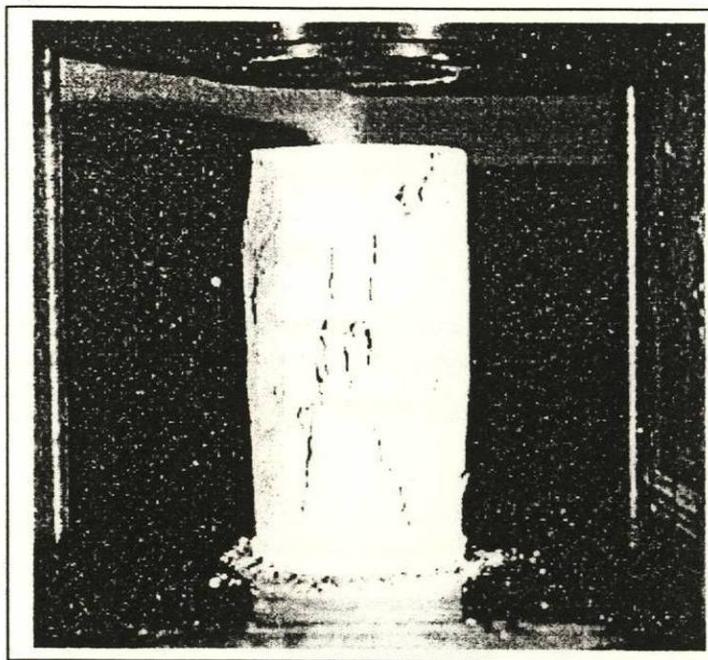


Figura 4.9.- Ensayo de resistencia a la compresión aplicado a las barras de concreto. [2]

#### **4.5 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL.**

El análisis petrográfico o microestructural se efectuó por observación simple bajo la norma ASTM C-856; por Microscopía Óptica y por Microscopía Electrónica de Barrido. También se efectuó el análisis químico cualitativo por EDX en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

#### **4.6 FRACTOGRAFÍA.**

La observación y descripción cualitativa de las superficies de fractura se realizó mediante fotografía, Microscopía Electrónica de Barrido y Microscopía de Fuerza Atómica. También se realizó digitalización tridimensional (3D). El uso concurrente de estas técnicas tuvo como objetivo conocer las características y morfología de las superficies en un amplio espectro de escalas, de magnificaciones y de observación.

##### **4.6.1 Fotografía.**

En el caso de la fotografía, además del método convencional se elaboraron pares estereográficos (ver apéndice 3).

#### **4.6.2 Microscopía Electrónica de Barrido.**

El análisis fractográfico en el MEB se realizó en el modo de electrones secundarios. Las superficies de fractura se recubrieron con oro para volverlas conductoras.

#### **4.6.3 Microscopía de Fuerza Atómica.**

En las observaciones de Microscopía de Fuerza Atómica, el equipo que se utilizó para caracterizar la superficie del concreto es el Microscopio de Fuerza Atómica, marca Quesant modelo 350, que como se puede observar en la figura 4.10.

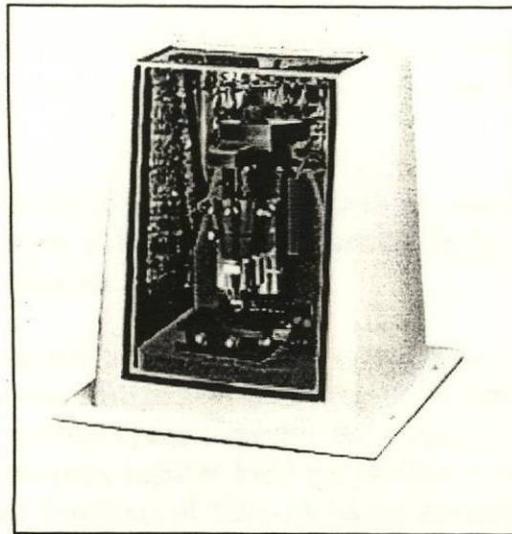


Figura 4.10.- Equipo de Microscopía de Fuerza Atómica.

El modo que se utilizó fue el de contacto y en altura constante; la frecuencia de barrido estuvo oscilando entre los 0.4 Hz hasta 8 Hz, y esto se debe a que primero esperamos a que la muestra estuviera fija sin vibraciones, lo cual lo conseguimos con frecuencias de barrido bajas, pero después se tuvo que aumentar la frecuencia debido a las pequeñas dimensiones de barrido. Todas las imágenes tienen una resolución de 512 x 512 píxeles.

#### **4.6.4 Digitalización tridimensional.**

Se identificaron las muestras con números y fueron cortadas en paralelo a la superficie de fractura con el objeto de aligerar su peso y poder ser manipuladas correctamente en el escáner 3D. Se les aplicó una capa de pintura color blanco mate para dar un adecuado contraste.

El tiempo aproximado de escaneo para cada una de las muestras varió de entre 5 hasta 20 minutos, siendo las variables; la rugosidad de la superficie de fractura y la resolución aplicada.

#### **4.7 FRACTOMETRÍA AUTOAFÍN.**

La descripción cuantitativa del carácter autoafín se realizó a partir de perfiles de alturas obtenidos mediante un digitalizador, así como de los perfiles de alturas extraídos de las imágenes de Microscopía de Fuerza Atómica.

##### **4.7.1 Obtención de perfiles mediante digitalizador plano.**

Para obtener una resolución con la calidad requerida se pintaron las probetas con un marcador indeleble color negro y así poder identificar el perfil (primera dimensión) del fondo (segunda dimensión).

El siguiente paso es la digitalización de los perfiles de cada probeta por medio de un sistema que captura la imagen y la copia a la pantalla de la computadora quedando los perfiles mostrados en la sección de resultados.

Una vez obtenidas las imágenes se les da una resolución de 512 píxeles de largo con el menor ancho posible. Una vez realizada esta resolución se utiliza el programa Paint Shop Pro 7 (software de diseño gráfico) para convertir las imágenes en blanco y negro o escala de grises utilizando un filtro para separar bien los perfiles y poderles hacer la corrección mínima. En caso de que no funcione el filtro se hacen las correcciones a mano (píxel x píxel) aumentando la imagen. Se guarda la imagen para que a ésta se le pueda hacer el análisis autoafín.

##### **4.7.2 Análisis autoafín.**

Mediante el análisis autoafín se determinó el exponente de rugosidad. Los perfiles de alturas se analizaron mediante el método de ventanas de ancho variable.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1 ENSAYO DE FLEXIÓN

En la tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de ensayo de flexión. Se les aplicó la carga máxima correspondiente a cada una de las 24 muestras para obtener su fractura.

Los resultados de las estadísticas por ensayo a flexión se realizaron por métodos como la media, varianza, y desviación estándar; éstos se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.1.- Resultados de las cargas máximas aplicadas, así como también la obtención del módulo de ruptura de las 24 muestras en el ensayo de flexión.

CARGA MÁXIMA (KN)	MÓDULO DE RUPTURA (MPa)
7.82	4.38
7.30	4.09
7.64	4.28
7.93	4.44
8.65	4.85
8.77	4.92
8.36	4.70
8.01	4.49
9.38	5.26
9.02	5.06
7.42	4.16
6.95	3.90
8.00	4.49
7.03	3.94
6.51	3.65
7.63	4.28
8.46	4.75
7.24	4.06
6.98	3.91
6.99	3.92
8.56	4.80
7.97	4.47
8.87	4.41
9.31	5.22

Tabla 5.2.- Resultados de las estadísticas en la prueba a flexión por los métodos de la media, varianza, y desviación típica.

PRUEBA	Media	Varianza	Desviación Estándar
Flexión (MPa)	4.44	1.90	0.4313

En la figura 5.1 se muestra es gráfico para determinar el módulo de Weibull, que tuvo un valor de 2.4. Éste valor puede considerarse bajo, y refleja la variabilidad de la resistencia encontrada para las diferentes probetas, cuyos valores fluctuaron entre 3.65 y 5.26 MPa. Esta variabilidad se explica por la heterogeneidad estructural y la presencia de poros y burbujas en el concreto. Como comparación, en cerámicos avanzados sinterizados a partir de materias primas de alta pureza, se obtienen valores del módulo de Weibull típicamente entre 10 y 20.

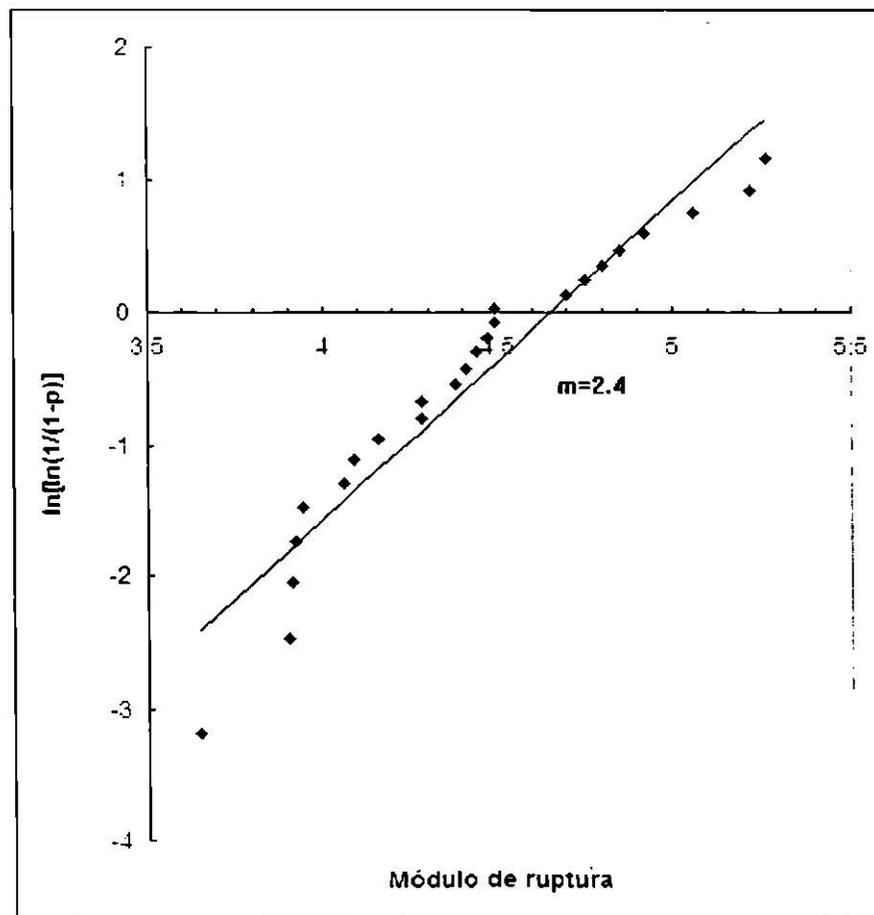


Figura 5.1.- Gráfico correspondiente a la probabilidad de que una muestra de concreto se fractura a diferentes cantidades por medio del módulo de Weibull.

## 5.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En la tabla 5.3 se muestran los resultados de resistencia a la compresión de las probetas de concreto. Los valores de la media, varianza y desviación estándar se indican en la tabla 5.4. estos resultados indican que el concreto obtenido tiene una resistencia promedio de 20.4 MPa, lo cual lo coloca justo en el límite de las clasificaciones de concreto de baja resistencia ( $\sigma < 40$  MPa) y concreto de resistencia moderada ( $20 < \sigma < 40$  MPa).

**Tabla 5.3 Resultados de las cargas y esfuerzos obtenidos de la resistencia a la compresión.**

<b>Carga Máxima (KN)</b>	<b><math>\sigma</math> (MPa)</b>
165.34	20.40
169.88	20.95
159.91	19.73

**Tabla 5.4. Resultados de las estadísticas en las prueba de resistencia a la compresión por los métodos de la media varianza, y desviación típica.**

<b>PRUEBA</b>	<b>Media</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>Compresión (MPa)</b>	20.39 MPa	2.58 MPa	0.5019 MPa

### 5.3 FRACTOGRAFÍA Y ANÁLISIS DE AUTOAFINIDAD.

#### 5.3.1 Fotografía

Las imágenes que a continuación se presentan son las fotografías estereográficas de una de las muestras (figura 5.2 y figura 5.3).

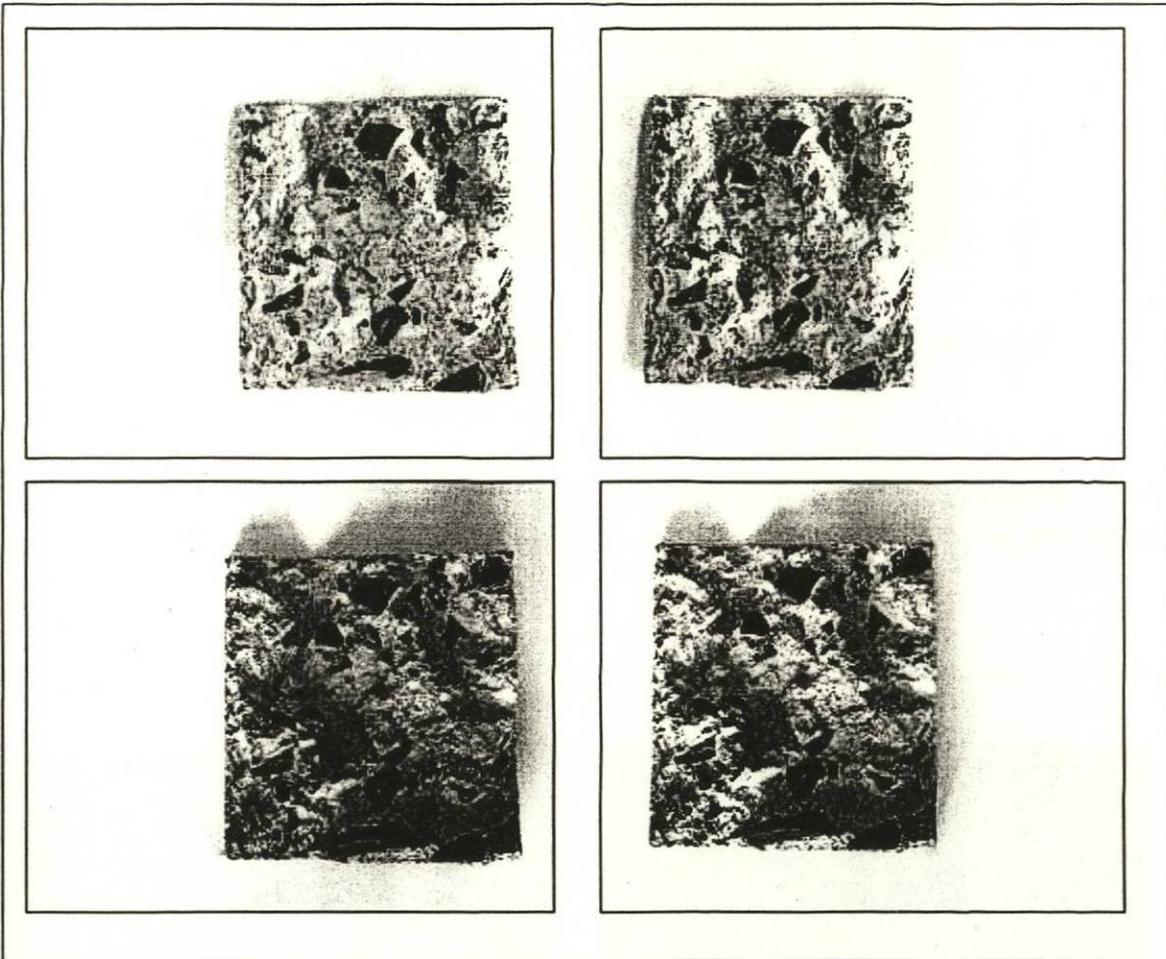


Figura 5.2.- Fotografías estereográficas de la probeta no.19.

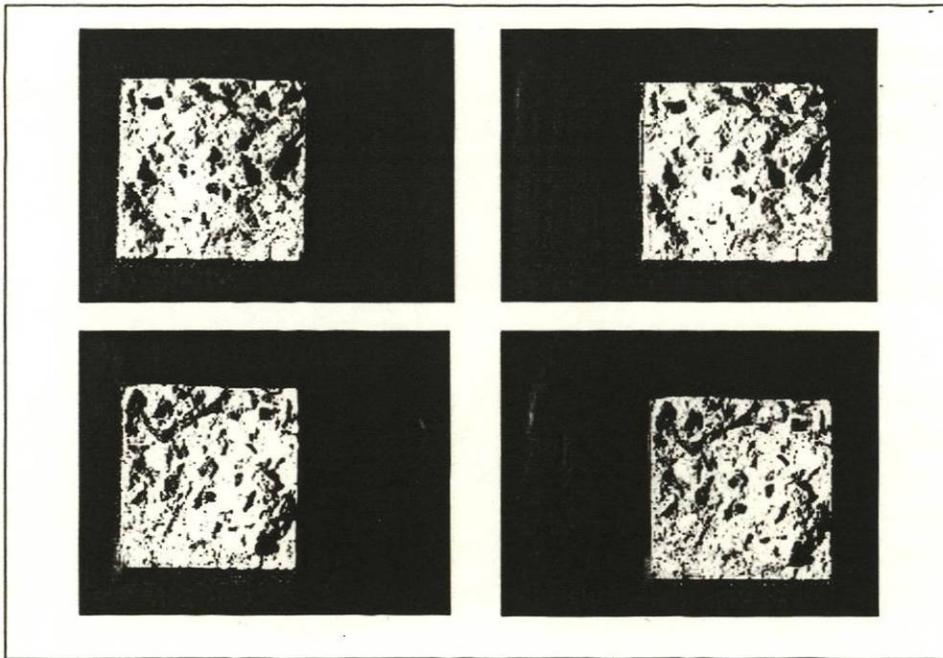


Figura 5.3.- Fotografía de la superficie de fractura de un par estereográfico.

### 5.3.2 Microscopía electrónica de barrido

En la figura 5.4 se muestran imágenes de superficies de fractura observadas en el MEB, incluyendo los datos correspondientes a las muestras y sus magnificaciones correspondientes.

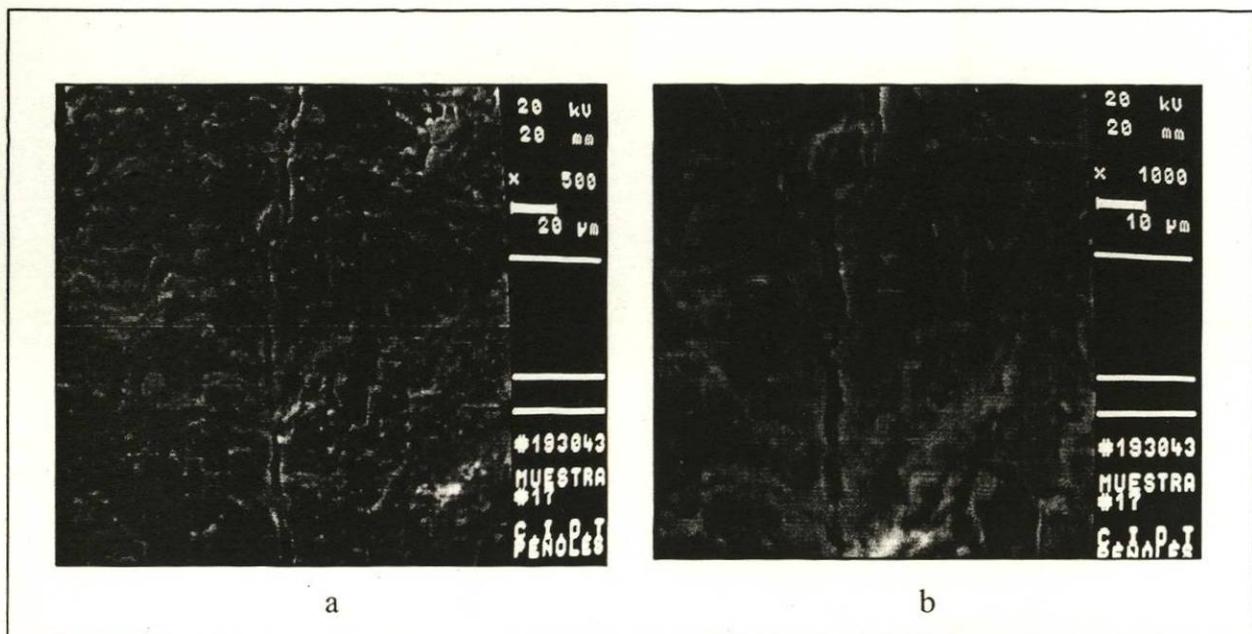


Figura 5.4.- (a) Imagen obtenida de una superficie de 20 mm de la muestra no. 17 por medio del SEM, a una resolución de  $500 \times 20 \mu\text{m}$  a 20 KV. (b) Imagen obtenida de una superficie de 20 mm de la muestra no. 17 por medio del MEB, a una resolución de  $1000 \times 10 \mu\text{m}$  a 20 KV.

En estos resultados se comprueba que a pesar de que el concreto cuenta con una buna resistencia, sigue siendo un material frágil ya que en las imágenes obtenidas por este método se observan las grietas secundarias sobre las superficies de fractura, que a simple vista uno no puede visualizar. La iniciación de una sola grieta da motivo a una propagación de una gran variedad de grietas más.

En la figura 5.5b observamos la composición química cualitativa por EDX correspondiente a la zona mostrada en la imagen 5.5a.

En los resultados obtenidos nos podemos dar cuenta del material que se encuentra hecha la muestra como se mencionó en la fabricación de las probetas, se pueden observar los agregados grueso como es la piedra en sí, al fondo de la imagen en un color gris se observa la combinación de los agregados finos con el cemento Pórtland e incluso algunas burbujas de aire que indican la porosidad de la muestra. En los resultados del espectro se muestran cada uno de los elementos para un análisis general de la muestra no. 12. Las cantidades exactas se muestran en la tabla 5.5.

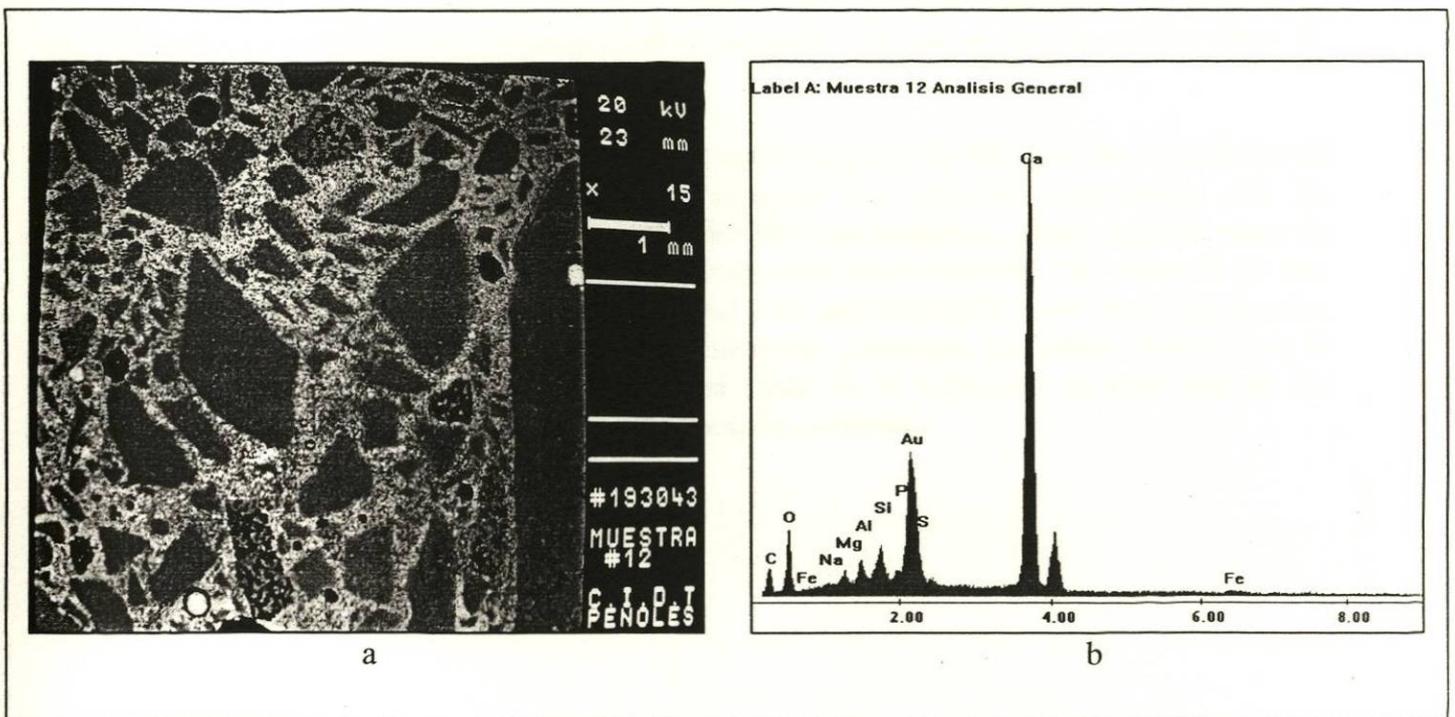


Figura 5.5.- (a) Imagen obtenida del espectro de rayos "x", muestra no.12 con una resolución de  $15 \times 1$  mm a 20 KV. (b) Espectro que muestra las cantidades de elementos obtenidos en la imagen "a".

Los resultados obtenidos en la tabla nos muestran que existen un porcentaje mayor de calcio (Ca) en la parte analizada y le sigue una cantidad considerable de oro (Au) que corresponde al recubrimiento que se aplicó a la muestra para poder realizar los barridos en el MEB.

**Tabla 5.5.-Porcentaje de los elementos químicos presentes en la muestra no. 12.**

<b>Elemento</b>	<b>Porcentaje %</b>
O K	31.38
Na K	0.45
Mg K	1.34
Al K	2.05
Si K	2.66
Ca K	60.73
Fe K	1.39
<b>Total</b>	<b>100.00</b>

### **5.3.3 Imágenes fractográficas tridimensionales por MFA y digitalización por láser.**

En la figura 5.6 se muestra una imagen obtenida por digitalización tridimensional por láser. Si bien la resolución no es muy alta, ésta técnica puede aprovecharse para obtener mapas de elevación que a su vez servirían para cálculos de rugosidad y de los momentos estadísticos de la distribución de alturas. Dicho de otra manera, pueden calcularse los parámetros autoafines, particularmente la longitud de correlación, ya que se cuenta con los datos de toda la muestra.

Por otra parte las figuras 5.7a, b, c y d muestran imágenes de MFA de las superficies de fractura en regiones localizadas, que por supuesto son pequeñas comparadas con las dimensiones de las probetas. El principal valor de éstas imágenes, desde nuestro punto de vista, es que se tienen mapas y perfiles de alturas con alta resolución del orden de 10 nm, que permiten calcular parámetros de rugosidad y de autoafinidad a nivel local. Igualmente, en conjunto con las demás técnicas aquí discutidas, permiten un análisis integral de la morfología y los modos de propagación, así como de la influencia de cada uno de los componentes de la microestructura en ésta complejo material.

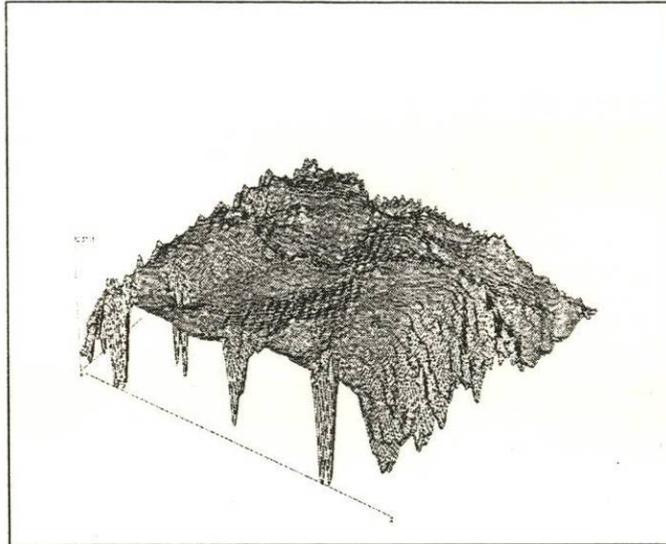


Figura 5.6.- Imagen obtenida por digitalización tridimensional por láser.

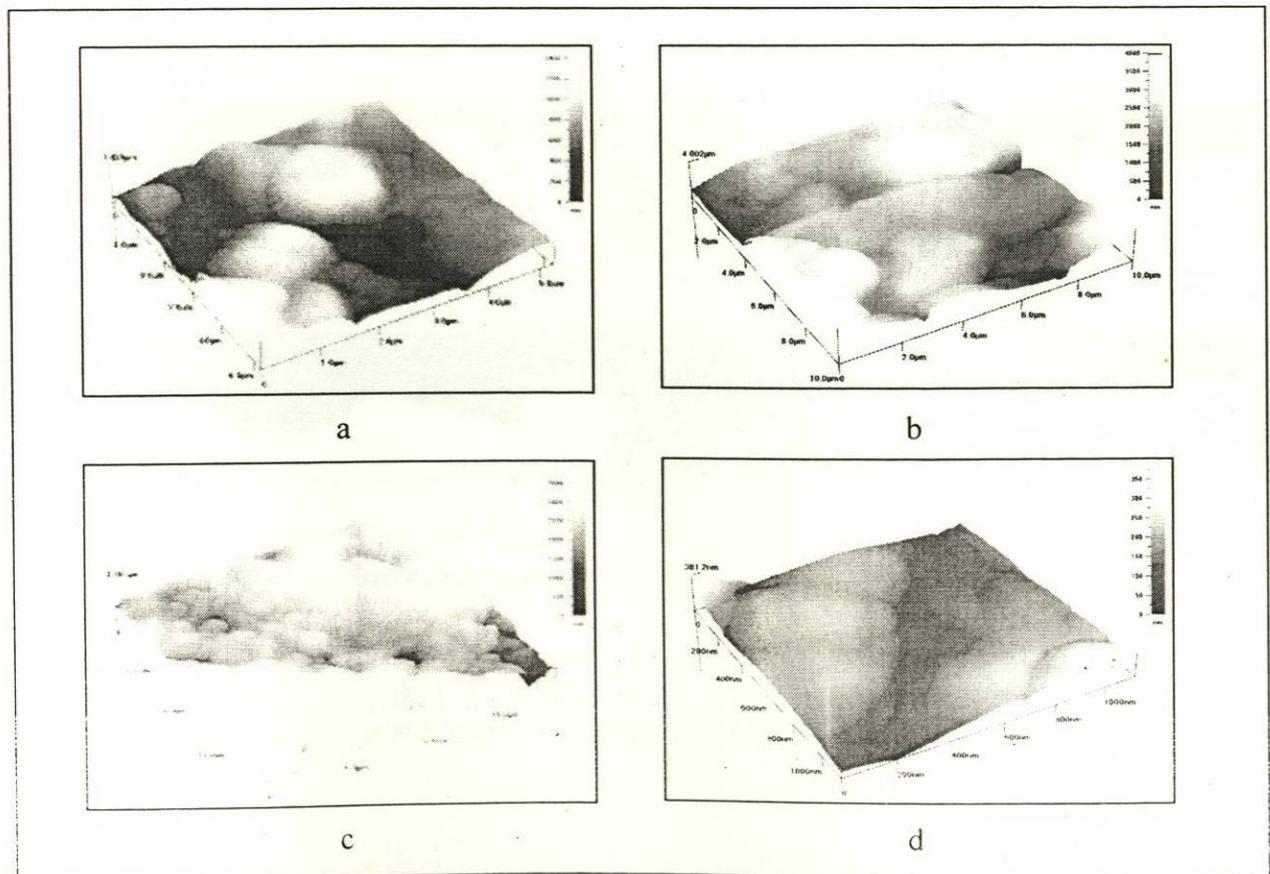


Figura 5.7.-Imágenes obtenidas de los barridos obtenidos por MFA. (a) Muestra capturada a  $5\mu\text{m}$ . (b) Muestra capturada a  $10\mu\text{m}$ . (c) Muestra capturada a  $20\mu\text{m}$ . (d) Muestra capturada a  $1200\text{nm}$ .

### 5.3.4 Perfiles de alturas obtenidas mediante el digitalizador plano.

En las figuras 5.8a, b, c y d; y 5.9a, b, c, y d se muestra la digitalización de los perfiles de la probeta no.3 en sus partes superior e inferior de fractura respectivamente.

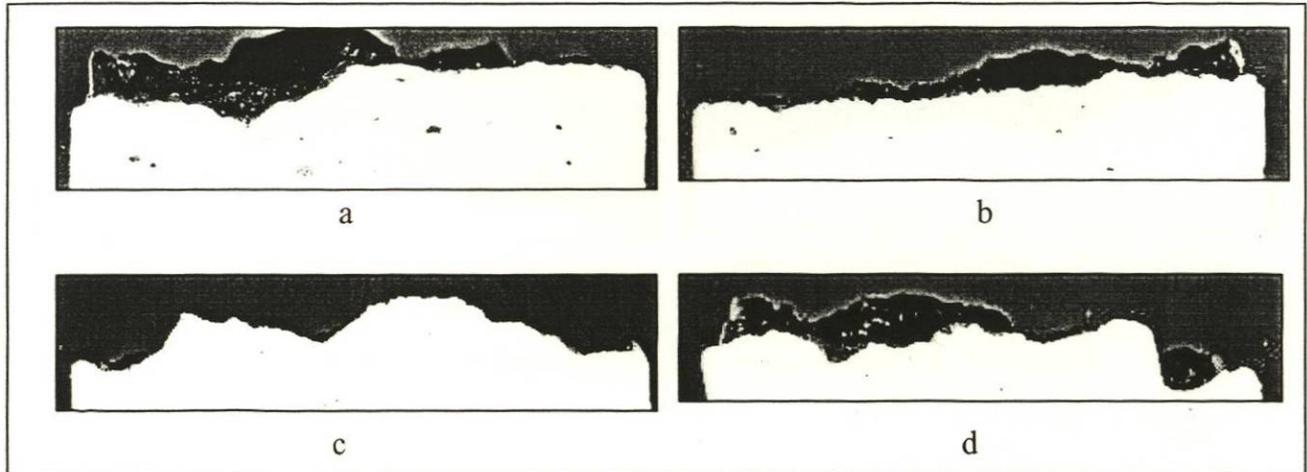


Figura 5.8.- Perfiles de la probeta no.3 en su parte superior de fractura.

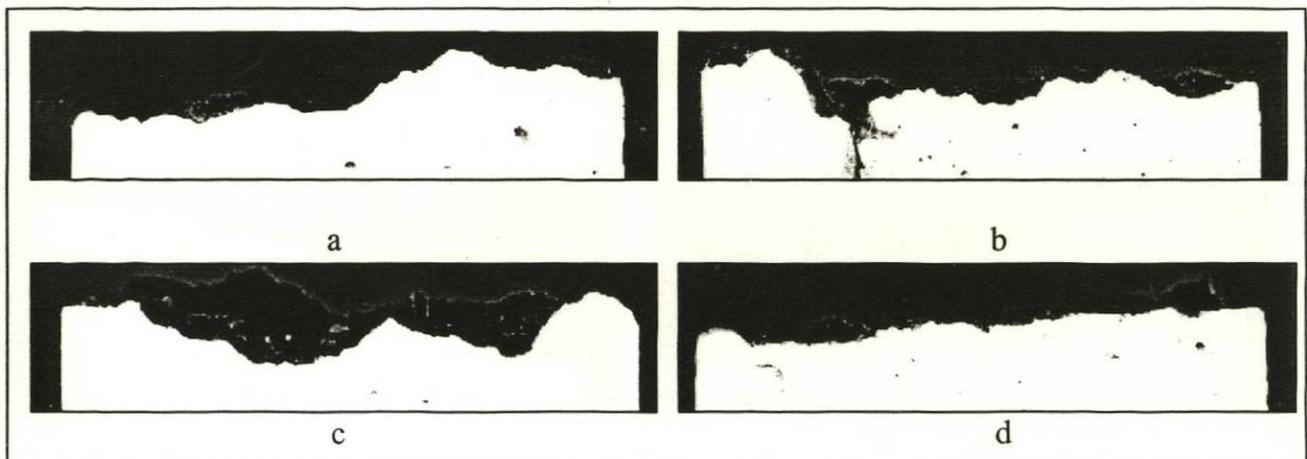


Figura 5.9.- Perfiles de la probeta no.3 en su parte inferior de fractura.

En las figuras 5.10a, b, c y d; y 5.11a, b, c, y d se muestra la digitalización de los perfiles de la probeta no.7 en sus partes superior e inferior de fractura respectivamente.

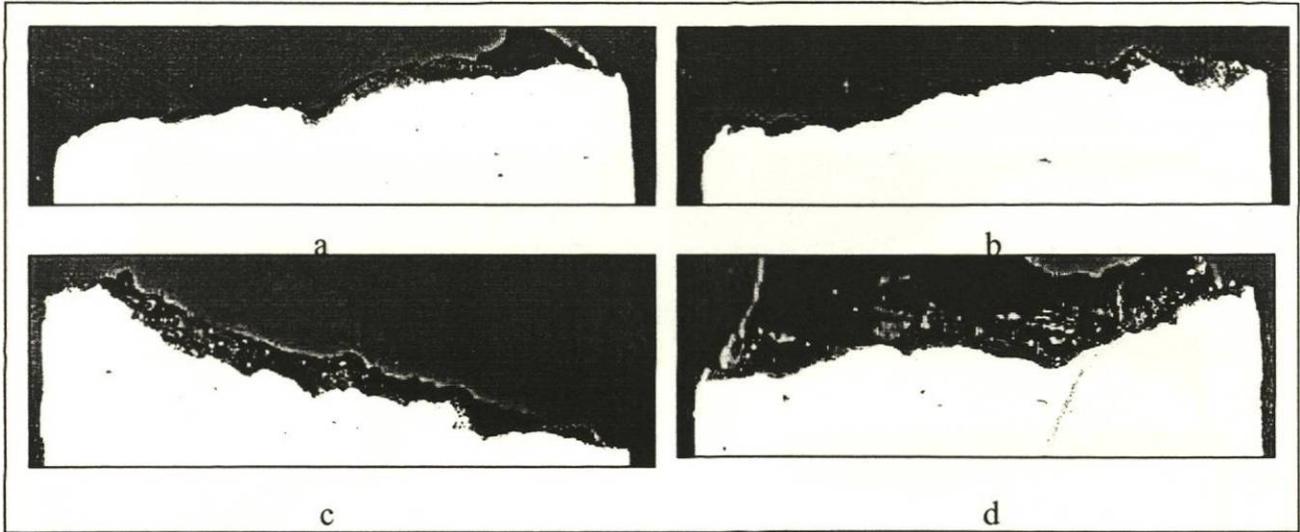


Figura 5.10.- Perfiles de la probeta no.7 en su parte superior de fractura.

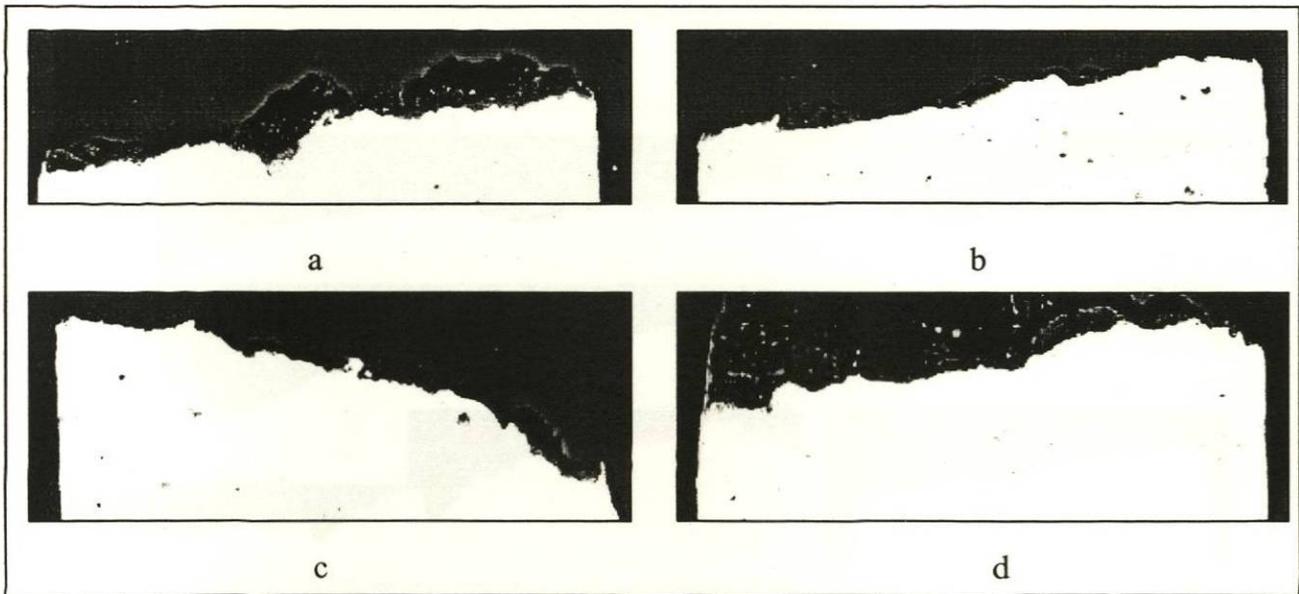


Figura 5.11.- Perfiles de la probeta no.7 en su parte inferior de fractura.

En las figuras 5.12 y 5.13 se muestran algunos perfiles extraídos mediante análisis de imágenes.



Figura 5.12.- (A) Primeros 512 píxeles de la probeta en el cuadro D, (B) Sigüientes 512 píxeles de la probeta señalada anteriormente, (C) Unión de perfiles [comparar con figura en inciso (D)], (D) Probeta no.3, perfil dividido con una línea para comparar los perfiles con el inciso C.

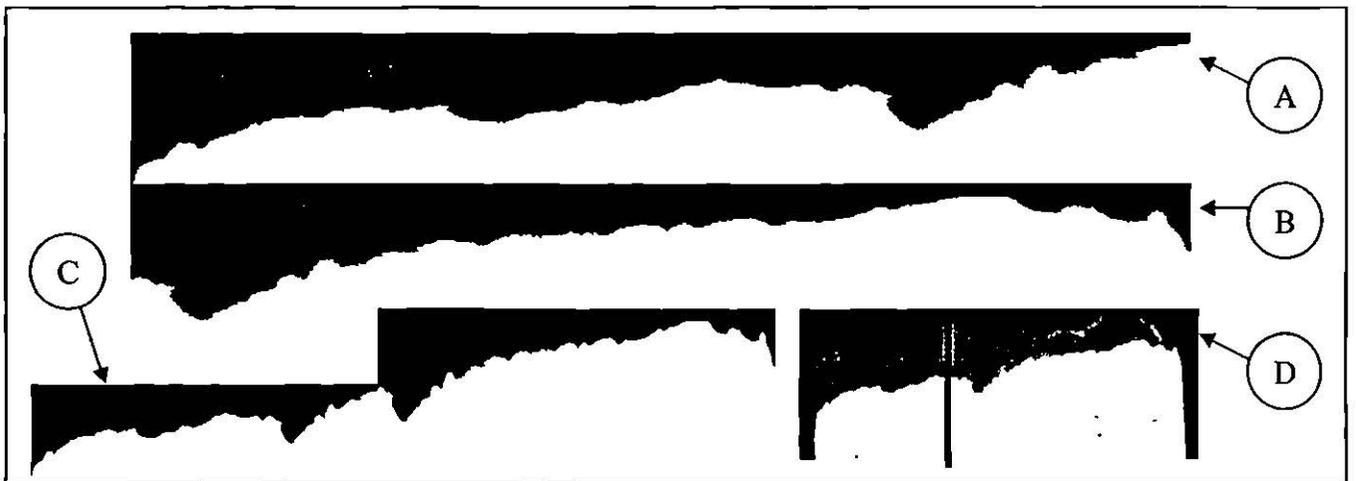


Figura 5.13.- (A) Primeros 512 píxeles de la probeta en el cuadro D, (B) Sigüientes 512 píxeles de la probeta señalada anteriormente, (C) Unión de perfiles [comparar con figura en inciso (D)], (D) Probeta no.7, perfil dividido con una línea para comparar los perfiles con el inciso C.

### 5.3.5 Análisis de autoafinidad.

En la figura 5.14 se muestra una curva de autoafinidad, obtenida a partir de los datos de perfiles capturados mediante el digitalizador plano.

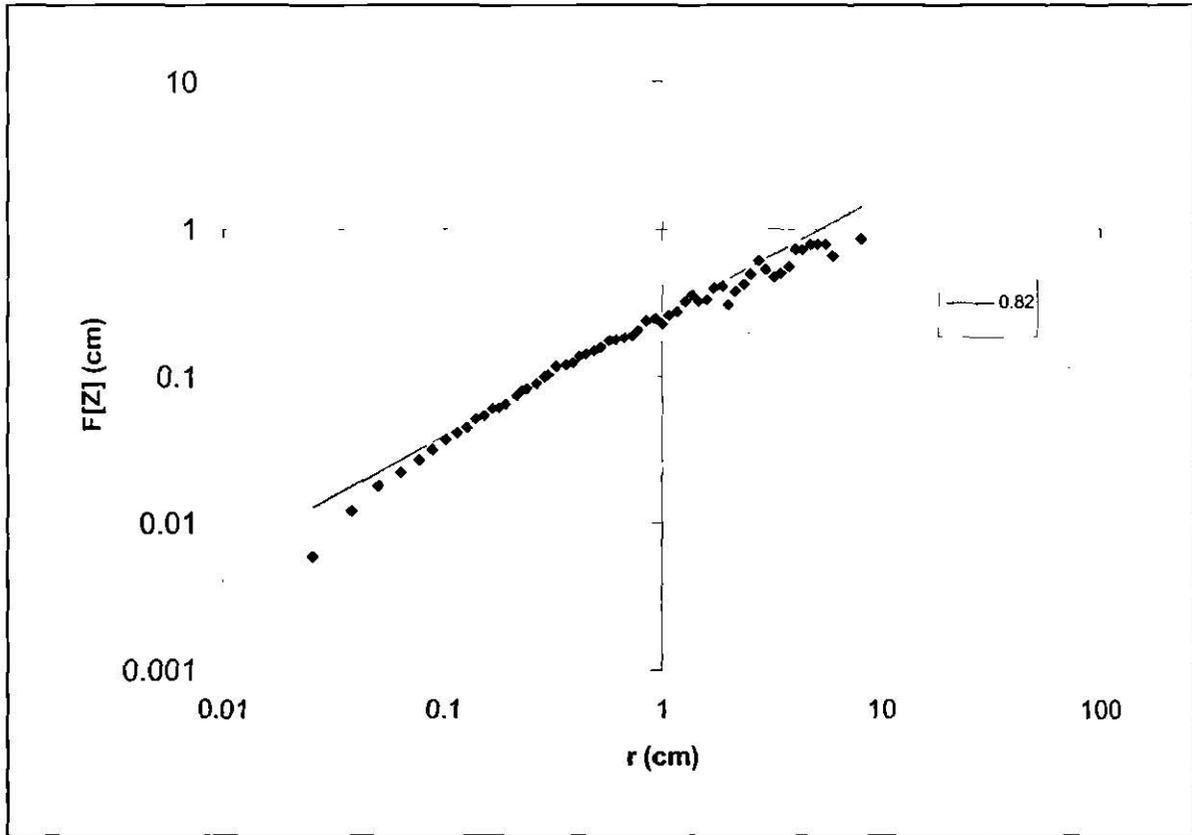


Figura 5.14.- Curva de autoafinidad, obtenida a partir de los datos de perfiles capturados mediante el digitalizador plano. Se comprueba que el exponente de Hurst se aproxima a 0.82 concordando con el valor de otros materiales.

El valor estimado para el exponente de Hurst es de 0.82. Este valor está en concordancia con los valores reportados para metales, polímeros y cerámicos en condiciones de propagación relativamente rápida. En esta curva no es posible discernir con precisión el valor de la longitud de correlación. Es pertinente mencionar que este análisis autoafín debe complementarse, en un trabajo futuro con más observaciones aprovechando las diversas técnicas aquí exploradas.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS PARA TRABAJOS FUTUROS

#### 6.1 CONCLUSIONES.

- Las probetas de concreto elaboradas para este estudio mostraron una resistencia a la compresión promedio de 20.4 MPa, en el límite entre las clasificaciones de concreto de baja resistencia y concreto de resistencia moderada.
- Hemos explorado la técnica de fotogrametría y la elaboración de pares estereográficos, como una alternativa para el análisis cualitativo y cuantitativo de las superficies de fractura a escala macroscópica.
- Los estudios fractográficos muestran que el carácter de la fractura se puede describir como “frágil”, con presencia de grietas secundarias.
- Fue posible obtener imágenes tridimensionales por digitalización con láser, que pueden emplearse para estudios cuantitativos, incluyendo análisis autoafín, de manera complementaria a otras técnicas más tradicionales.
- También fue posible obtener imágenes tridimensionales por microscopía de fuerza atómica, en barridos micrométricos, con resolución nanométrica.
- Hemos demostrado que es posible emplear la sencilla técnica del digitalizador plano para obtener perfiles de alturas a todo lo largo de las muestras de superficies de fractura, para llevar a cabo determinaciones cuantitativas de rugosidad y análisis autoafín.
- El uso concurrente de las diferentes técnicas exploradas en el presente trabajo permite la descripción cuantitativa de la topografía de fractura, cubriendo escalas del orden nanométrico hasta longitudes de más de diez centímetros, cubriendo por lo tanto ocho décadas de escala de longitud.
- El análisis autoafín preeliminar, realizado sobre perfiles de alturas obtenidos por la técnica del digitalizador plano, indica que el exponente de rugosidad tiene un valor de 0.82, en concordancia con los valores reportados para otros materiales en similares condiciones cinéticas de ruptura.

## 6.2 PERSPECTIVAS PARA TRABAJOS FUTUROS.

- En este trabajo hemos explorado distintas técnicas que pueden explotarse para el análisis autoafín de superficies de fractura a nivel macroscópico, particularmente en materiales como el concreto.
- Una de las técnicas que pueden aprovecharse en particular es el digitalizador tridimensional a partir de los pares estereográficos, con éstas técnicas se podrán obtener grandes cantidades de datos precisos para el análisis autoafín. Es de especial interés la determinación de la longitud de correlación.
- Es también recomendable realizar un estudio autoafín más amplio aprovechando la MFA.

## APÉNDICE

### A1.- EL CONCRETO

#### **El concreto como material estructural.**

El material de construcción más extensamente usado es el concreto, que se hace generalmente mezclando cemento Pórtland con arena, piedra triturada y agua.

El concreto no es tan resistente ni tan tenaz como el acero más posee una excelente resistencia al agua; esto hace que se le llame un material ideal para estructuras destinadas a controlar, almacenar y transportar agua. En la figura A1.1 se muestra una cisterna enterrada para el almacenamiento de agua del Country Club.

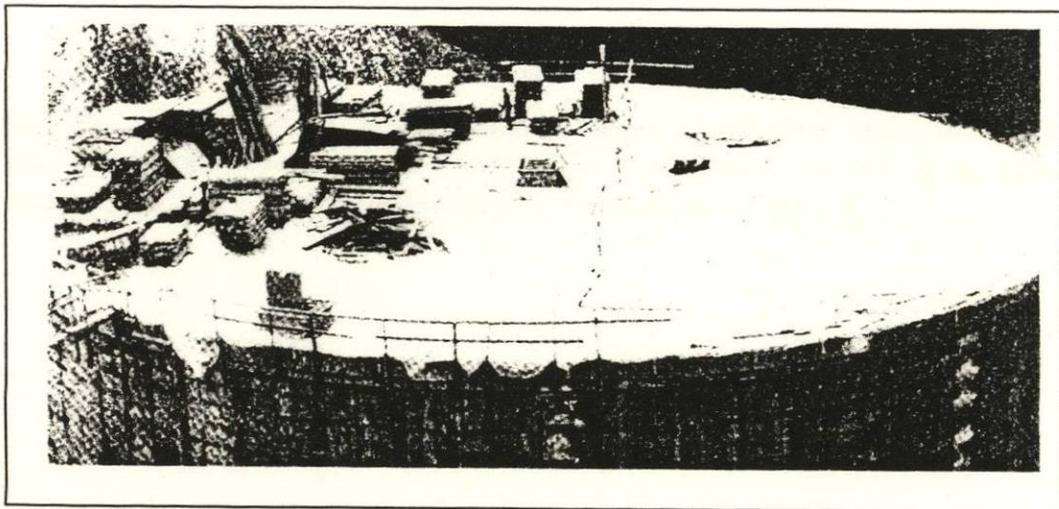


Figura A1.1.- Ésta estructura enterrada de concreto para el almacenamiento de agua, ubicada en las colinas de Oakland - Berkeley, se construyó en 1976-1977 y tiene una capacidad de  $132 \times 10 \text{ m}^3$ . Tiene 37m de diámetro, 9m de alto y un muro de 25 a 35 cm. de espesor.

En la figura A1.2 se muestra un Proyecto de tubería en Arizona central (a), así como también la Presa Itaipú, Brasil (b); y el Acueducto de California (c).

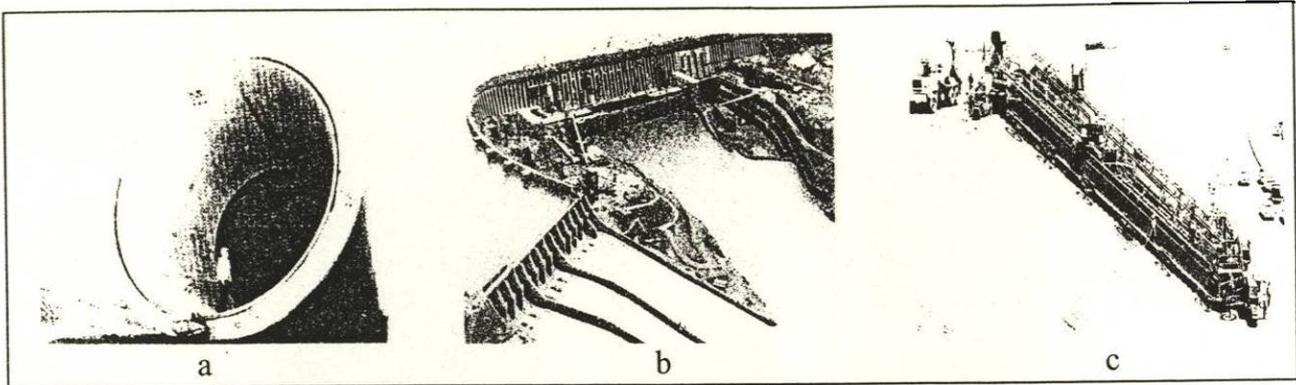


Figura A1.2.- (a) La estructura circular de concreto precolado más grande hasta hora construida para el transporte de agua; (b) Éste espectacular proyecto hidroeléctrico consta de una presa de gravedad de concreto hueca de 180m de alto en el río Paraná, en la frontera Brasil-Paraguay, (c) Una de las primeras decisiones para el diseño del acueducto de California fue la de construir un canal de concreto en lugar de un canal de tierra compactada, debido a que los canales forrados con concreto tienen una pérdida de carga relativamente más baja, un bombeo y un costo de mantenimiento más bajo y una menor pérdida por filtración.

De la durabilidad del concreto frente a algunas aguas agresivas se puede decir que se ha extendido a ambientes hostiles tanto industriales como naturales tal es el caso de la plataforma marítima de concreto en Statford B, Noruega en la figura A1.3.

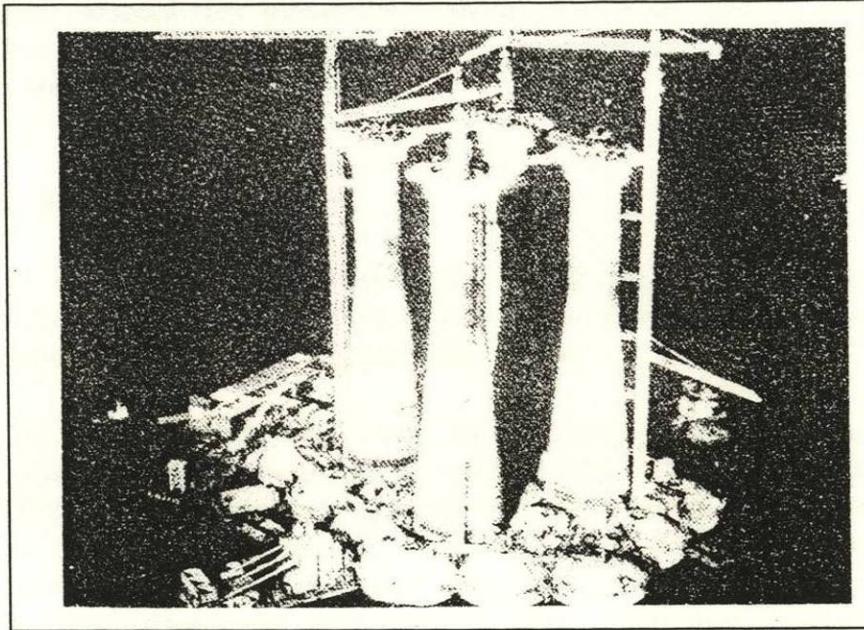


Figura A1.3.- Los elementos de concreto presforzado y fuertemente reforzado de la estructura están expuestos a la acción corrosiva del agua de mar y fueron diseñados para resistir olas de 31m de altura. Por lo tanto, la selección y el proporcionamiento de los materiales para la mezcla del concreto fueron regidos principalmente por la consideración de la velocidad de la construcción empleando cimbras deslizantes y la durabilidad del concreto endurecido ante ese ambiente hostil. Los cilindros apuntalados durante la operación de la cimbra deslizante se muestran en ésta figura.

Los elementos estructurales expuestos a la humedad como pisos, columnas, techos, muros exteriores y los pavimentos, se construyen frecuentemente con concreto, que es reforzado con acero. El concreto reforzado contiene varillas de acero y es diseñado bajo la suposición de que los dos materiales se unen para resistir fuerzas.

Los elementos del concreto estructural pueden ser moldeados para dar una variedad de formas y tamaños, esto debido a que la consistencia plástica fluye y después de varias horas la cimbra puede ser removida para volverse a utilizar, cuando el concreto se haya solidificado y endurecido hasta formar una masa resistente.

El concreto tiene características como menos insumo de energía en la producción del mismo, muchos desperdicios industriales pueden reciclarse; por lo tanto a futuro las consideraciones sobre energía y conservación de recursos naturales harán del concreto un material atractivo.

### **Componentes del concreto moderno.**

El concreto se compone esencialmente en un medio conglomerante dentro del cual se hallan ahogadas partículas o fragmentos de agregados. El concreto de cemento hidráulico se forma por una mezcla de concreto hidráulico y agua.

El agregado es el material granular, como arena, grava, piedra triturada o la escoria de acero de alto horno. El agregado grueso, se refiere a las partículas de agregado mayores de 4.75 mm (Malla No.4) y el término agregado fino, se refiere a las partículas de agregado menores de 4.75 mm pero mayores de 75  $\mu\text{m}$  (Malla No.200). La grava es el agregado grueso que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesamiento de conglomerado de adherencia débil. El término arena es comúnmente utilizado para el agregado fino que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesado de piedra caliza deleznable. La piedra triturada es el producto que resulta del triturado industrial de piedras bola, de rocas, o de grandes pedruscos. La escoria de alto horno, un subproducto de la industria del acero, es el material que se obtiene al triturar escoria de alto horno solidificada bajo condiciones atmosféricas.

El mortero es una mezcla de arena, cemento y agua. El mortero fluido es un material cementante y agregado, generalmente agregado fino y una consistencia fluida sin segregación de sus componentes.

El concreto lanzado se transporta neumáticamente a través de una manguera y se proyecta sobre una superficie a alta velocidad.

El cemento es un material finamente pulverizado que desarrolla la propiedad conglomerante por las reacciones químicas entre los minerales del cemento y el agua. Se le llama cemento hidráulico cuando los productos de la hidratación son estables en un medio acuoso. El cemento Pórtland consiste principalmente de silicatos de calcio hidráulico. Los hidratos de silicato de calcio que se forman con la hidratación del cemento Pórtland son los responsables principales de sus características adherentes y son estables en un medio acuoso.

Los aditivos casi siempre se utilizan en la práctica moderna. Estos se definen como materiales diferentes a los agregados, y vaya la redundancia se agregan a las mezclas de concreto inmediatamente antes o durante el mezclado. Los aditivos para la reducción de agua pueden hacer más plástica la mezcla de concreto fresco al reducir la tensión superficial del agua; los aditivos para incluir aire pueden mejorar la durabilidad del concreto expuesto a climas fríos, los aditivos minerales pueden reducir el agrietamiento en el concreto masivo.

## **Tipos de concreto.**

La información que a continuación se da es con base al peso unitario del concreto.

El concreto contiene arena natural y grava o agregados de roca triturada que pesa aproximadamente 2,400 kg. /m<sup>3</sup>, es conocido como concreto de peso normal y se utiliza para propósitos estructurales. El término concreto ligero se utiliza para un concreto que pesa menos de 1800 kg. /m<sup>3</sup>. El concreto pesado es más usado para escudos contra radiación y producido con agregados de alta densidad con un peso general más de 3,200 Kg. /m<sup>3</sup>.

Existe una clasificación del concreto debido a su resistencia:

- Concreto de baja resistencia: menos de 20 Mpa (204 kgf/cm<sup>2</sup>) de resistencia a la compresión.
- Concreto de resistencia moderada: de 20 Mpa a 40 Mpa (204 a 408 kgf/cm<sup>2</sup>) de resistencia a la compresión.
- Concreto de alta resistencia: más de 40 Mpa (408 kgf/cm<sup>2</sup>) de resistencia a la compresión.

## **Propiedades del concreto endurecido y su significado.**

La selección de una material de ingeniería para una aplicación en particular, tiene que tomar en cuenta su capacidad para resistir la fuerza aplicada. Tradicionalmente, la deformación que ocurre como resultado de una carga aplicada se conoce como deformación unitaria, la carga se expresa como esfuerzo, que se define como la fuerza por unidad de área. Dependiendo de cómo el esfuerzo actúa sobre el material, los esfuerzos son también distinguidos uno de otro, por ejemplo, en compresión, tensión, flexión, cortante y torsión. Las relaciones esfuerzo/deformación unitaria en los materiales se expresan generalmente en términos de resistencia, módulo de elasticidad, ductilidad y tenacidad.

La resistencia es una medida de la cantidad del esfuerzo requerido para hacer fallar un material. La teoría del esfuerzo de trabajo para el diseño de concreto considera que éste es el más adecuado para soportar la carga de compresión; ésta es la razón por la cual la resistencia a la compresión del material es la que se especifica más generalmente. Tradicionalmente las especificaciones y las pruebas para la resistencia del concreto se basan en muestras curadas bajo condiciones estándar de temperatura y humedad, por un período de 28 días.

Inicialmente, cuando la deformación unitaria es proporcional al esfuerzo aplicado y es reversible al descargar el espécimen, se le llama deformación elástica. El módulo de elasticidad se define como la relación entre el esfuerzo y esta deformación unitaria

reversible. El módulo de elasticidad del concreto a la compresión varía de  $14 \times 10^3$  al  $40 \times 10^3$  Mpa. Su límite elástico representa el esfuerzo máximo antes de que el material sufra deformaciones permanentes. A un alto nivel de esfuerzo la deformación unitaria permanece proporcional al esfuerzo aplicado y también se vuelve permanente es por eso que se llama plástica o deformación inelástica.

La tenacidad y resistencia son cosas muy diferentes, la primera es una medida de energía y la segunda es una medida del esfuerzo requerido para romper el material.

Generalmente cuando la resistencia de un material aumenta, la ductilidad y la tenacidad disminuyen igualmente, materiales de muy alta resistencia fallan en general de una manera frágil.

El comportamiento esfuerzo/deformación unitaria de los materiales mostrados en la figura A1.4 es típico de especímenes cargados en el laboratorio para fallar en un corto tiempo. Si un espécimen de concreto es sometido por un largo período a esfuerzo constante mostrará una deformación plástica. El fenómeno del incremento gradual de la deformación con el paso del tiempo bajo un esfuerzo sostenido se conoce como flujo plástico.

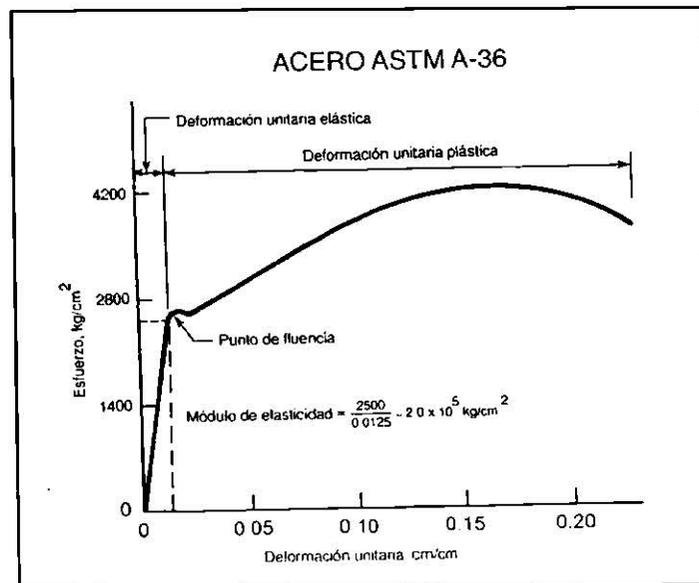


Figura A1.4.- Comportamiento esfuerzo – deformación de un espécimen de acero sujeto a cargas incrementadas.

Puesto que la resistencia a la tensión del concreto es baja, las estructuras de concreto se agrietan a menudo como resultado de la retracción restringida, causada ya sea por cambios en la humedad o en la temperatura.

Un juicio profesional en la selección de un material se deberá tomar en cuenta no solo la resistencia, la estabilidad dimensional y las propiedades elásticas del material, sino también la durabilidad que tiene serias implicaciones económicas de los costos de mantenimiento y reparación de una estructura. La durabilidad es definida como la vida de servicio de un material bajo ciertas condiciones ambientales.

## **Estructura del concreto.**

### **Conceptos.**

Los elementos gruesos de la estructura de un material pueden verse fácilmente, mientras que los elementos más finos son en general detectados con la ayuda de un microscopio. El término macroestructura se utiliza generalmente para la estructura total, visible al ojo humano.

El límite de detección del ojo humano sin ayuda es de aproximadamente un quinto de milímetro ( $200\mu\text{m}$ ). El término de microestructura se utiliza para la parte amplificada microscópicamente de una macroestructura. La capacidad de amplificación de los microscopios modernos ópticos electrónicos, es del orden de  $10^5$  veces así, la aplicación de las técnicas de microscopía óptica de transmisión y rastreo electrónico, ha hecho posible detectar la estructura de los materiales hasta una fracción de un micrómetro.

### **Significado.**

Las propiedades se pueden modificar haciendo cambios adecuados en la estructura de un material. Aunque el concreto es el material estructural más ampliamente utilizado, su estructura es heterogénea y altamente compleja. Las relaciones estructura – propiedades en el concreto no se han desarrollado aun completamente; sin embargo, un entendimiento de algunos de los elementos de la estructura del concreto es esencial.

### **Complejidades.**

En el nivel macroscópico el concreto se puede considerar un material de dos fases, consistentes en sus partículas de agregado dispersas en una matriz de pasta de cemento (figura A1.5).

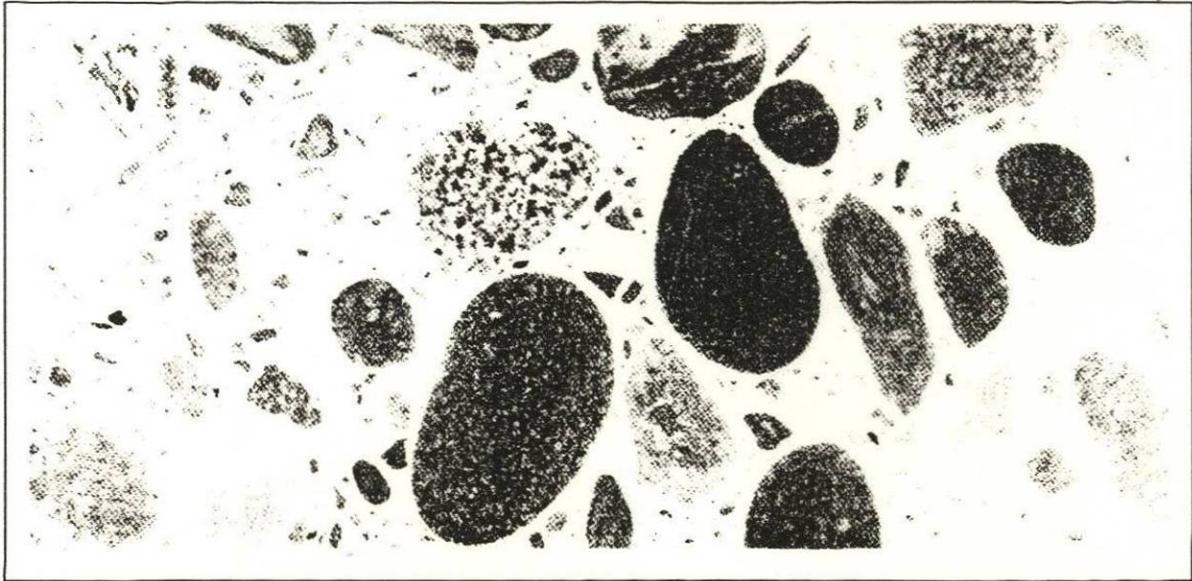


Figura A1.5.- Sección pulida de una muestra de concreto. La macroestructura total de un material que es visible al ojo humano sin ayuda. En la macroestructura del concreto se distinguen fácilmente dos componentes: agregados de variadas formas y dimensiones y medio aglutinante que consiste en una masa incoherente de la pasta de cemento hidratado.

En el nivel microscópico las dos fases de la estructura no son homogéneamente distribuidas una con respecto a la otra, ni son ellas mismas homogéneas (figura A1.6).

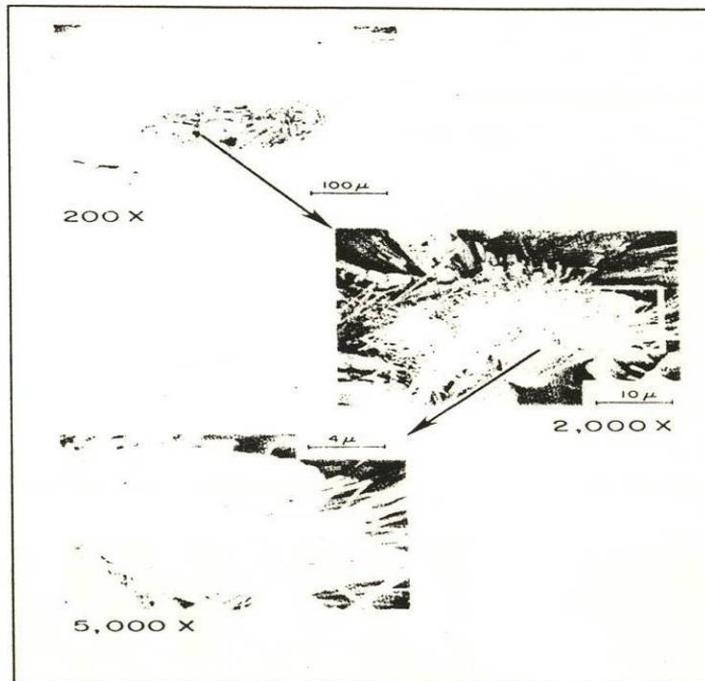


Figura A1.6.- Microestructura de una pch. Una amplificación baja (200x) micrografía electrónica de una pch, muestra que la estructura no es homogénea: mientras algunas áreas son densas, las otras son altamente porosas.

Igualmente si varias muestras de concreto que contienen la misma cantidad de cemento pero diferentes cantidades de agua se examinan a varios intervalos de tiempo, se verá que en general, el volumen de los huecos capilares en la pasta de cemento hidratada (pch) disminuye al incrementarse la relación agua/cemento, o al aumentar la edad de la hidratación.

Los aspectos únicos de la estructura del concreto pueden resumirse de la manera siguiente cuando la interface que es el límite común entre los materiales se trata como un tercer componente del concreto:

Primero hay una tercera fase, la zona de transición, que representa la región límite común entre las partículas del agregado grueso y la pch. Existiendo como un cascarón delgado, generalmente de 10 a 50  $\mu\text{m}$  de espesor de alrededor del agregado grueso, la zona de transición es en general más débil que cualquiera de los dos componentes principales del concreto y, por lo tanto, ejerce una influencia mayor en el comportamiento mecánico del concreto que lo que su tamaño refleja. Segundo, cada una de las tres fases está, por su parte, compuesta de multifases en su naturaleza. Tercero, a diferencia de otros materiales de ingeniería, la estructura del concreto no permanece estable (es decir, no es una característica intrínseca del material). Esto es debido a los dos componentes de la estructura: la pch y la zona de transición, están sujetos a cambios con el tiempo, humedad del medio ambiente y temperatura.

## Estructura de la fase agregado.

La fase de agregado es predominantemente responsable del peso unitario, del módulo de elasticidad y de la estabilidad dimensional del concreto.

La composición química o mineral de las fases sólidas del agregado es generalmente menos importante que las características físicas tales como el volumen, el tamaño y la distribución de los poros.

Algunas partículas típicas de agregado se muestran en la figura A1.7.

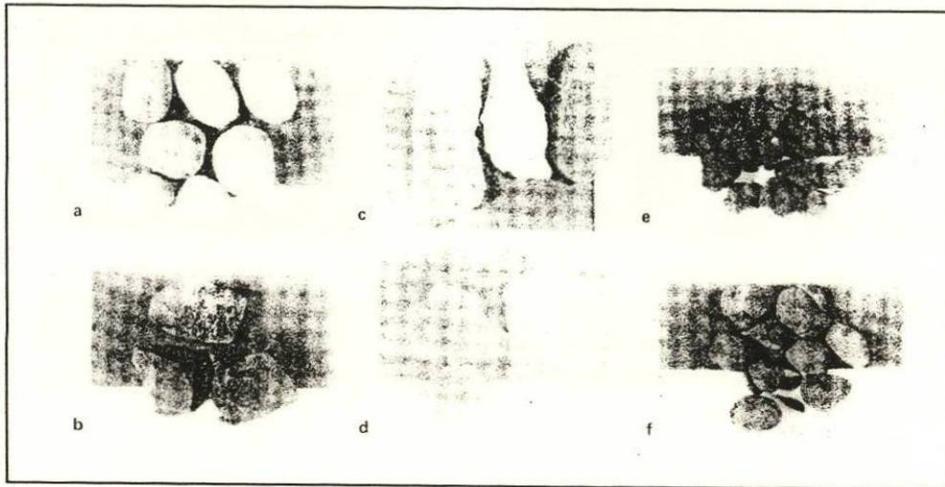


Figura A1.7.- Forma y textura superficial de partículas de agregado: a) Grava, redondeada y suave; b) Piedra triturada, equidimensional; c) Piedra triturada, alargada; d) Piedra triturada plana; e) De peso ligero, angular y rugosa; f) De peso ligero redondeada y lisa.

Es obvio, por la figura A1.8, que cuanto más grande sea el agregado en el concreto y mayor la proporción de partículas alargadas y planas, mayor será la tenacidad de películas de agua a acumularse cerca de la superficie del agregado, debilitando así la zona de transición de la pasta de cemento/agregado. Este fenómeno es conocido como sangrado interno y es responsable de la falla por cortante-adherencia en la superficie de la partícula de agregado.

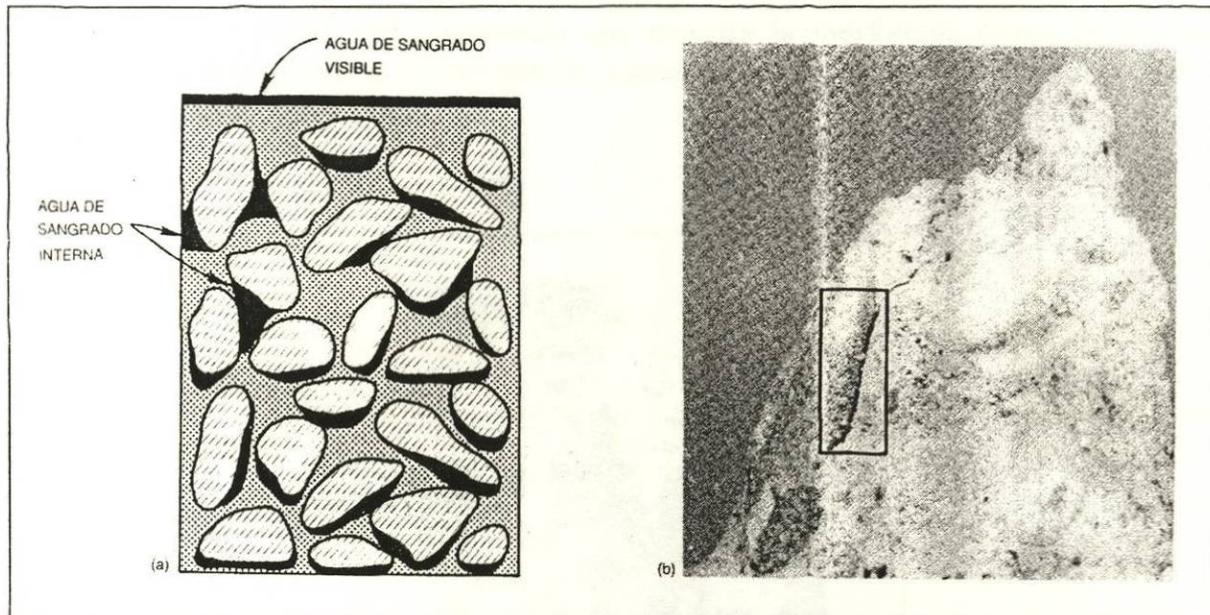


Figura A1.8.- Diagrama que representa el sangrado en un concreto recientemente colocado; b) Falla por cortante–adherencia en una muestra de concreto probada en compresión uniaxial.

El agua de sangrado interno tiende a acumularse en la vecindad de partes de agregado de forma alargada, plana y delgada. En estos lugares, la zona de transición del agregado – pasta de cemento tiende a ser débil y fácilmente propensa a microagritarse. Este fenómeno es responsable de la falla por cortante–adherencia en la superficie de la partícula de agregado.

La pch se utiliza en este texto para referirse generalmente a pastas hechas en cemento Pórtland.

El cemento Pórtland anhidro es un polvo gris que consiste en partículas angulares, generalmente dentro del rango de 1 a 50  $\mu\text{m}$ . Se produce pulverizando el clinker con una pequeña cantidad de sulfato de calcio; siendo el clinker una mezcla heterogénea de varios minerales producidos por reacciones a alta temperatura entre óxido de calcio y sílice, alúmina y óxido de hierro. La composición química de los principales minerales del clinker corresponde aproximadamente a  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ ; en un cemento Pórtland ordinario sus cantidades respectivas son generalmente del rango entre 45 y 60, 15 y 30, 6 y 12, y 6 y 8 por ciento.

El cemento Pórtland es dispersado en el agua, el sulfato de calcio y los componentes de calcio a alta temperatura tienden a disolverse y la fase líquida se satura rápidamente con varias especies de iones. Como resultado de las combinaciones entre iones de calcio, de sulfatos, de aluminato y de iones hidroxilo, a los pocos minutos de la hidratación del

ocupados por agua y por las partículas de cemento en solución. Después de algunos días la esfingita se vuelve inestable y se descompone para formar el hidrato de monosulfato, que contiene una morfología de placa-hexagonal.

Un barrido con micrografía electrónica que muestra la morfología típica de las fases preparadas con una mezcla de solución de aluminato de calcio, con solución de sulfato de calcio, se muestra en la figura A1.9.

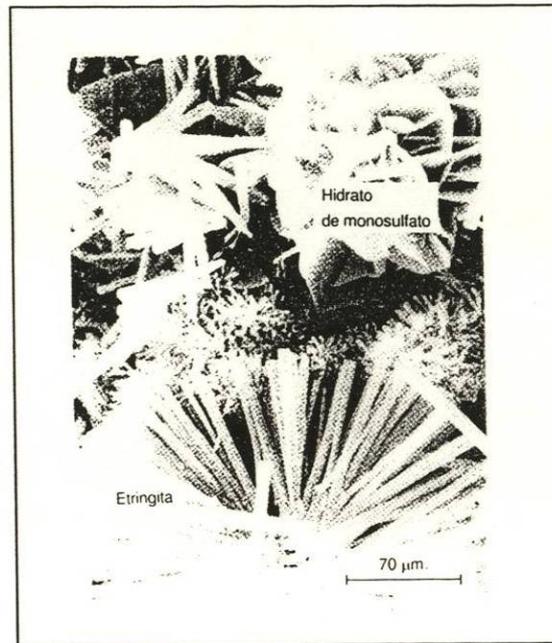


Figura A1.9.- Exploración micrográfica electrónica de cristales típicos hexagonales de hidrato de monosulfato y cristales en forma de aguja de etringita, formados al mezclar soluciones de aluminato de calcio y sulfato de calcio.

En la figura A1.10 se puede notar que las distintas fases no están uniformemente distribuidas ni tienen uniformidad en tamaño ni en morfología.

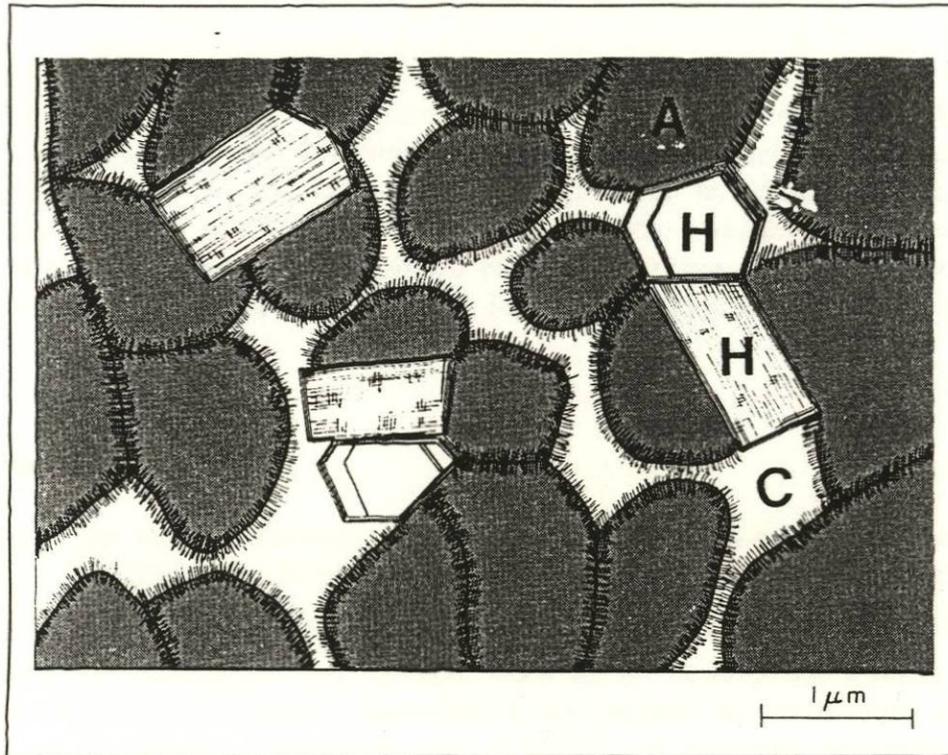


Figura A1.10.- Modelo de una pasta de cemento Pórtland bien hidratada. *A*, representa la agregación de partículas pobremente cristalinas de H-S-C que tiene por lo menos una dimensión coloidal. *H*, representa los productos cristalinos hexagonales, ellos forman grandes cristales generalmente de 1 μm.

Las partículas anhidras del cemento tienen una tendencia de atraerse unas con otras y a formar grupos, las cuales atrapan grandes cantidades del agua de la mezcla. En sistemas de pasta de cemento altamente viscosa, no solamente la forma y el tamaño de los poros, sino también los productos cristalinos de hidratación, son conocidos por su diferencia al compararlos con conjuntos bien dispersados.

### **Sólidos en la pasta.**

Los tipos, cantidades y característica de las cuatro fases sólidas principales, presentes generalmente en una pch, que se pueden detectar por medio de un microscopio electrónico, son los siguientes:

#### **Hidrato de silicato de calcio (H-S-C).**

Representa de 50 a 60 por ciento del volumen de sólidos en una pasta de cemento Pórtland completamente hidratada, el más importante para determinar las propiedades de la pasta. Se asemeja al mineral natural tobermorita; es por ello que el H-S-C fue llamado algunas veces gel de tabernita.

De acuerdo con el modelo de Power Brunauer, el material tiene una estructura de capas con un área superficial alta. Se han propuesto áreas superficiales del orden de 100 a 700 m<sup>2</sup>/g para el H-S-C. La resistencia del material es atribuida principalmente a las fuerzas de Van der Waals, siendo el tamaño de los poros del gel o de la distancia sólido-a-sólido de aproximadamente 18 Å. El modelo de Feldman-Sereda, considera a la estructura H-S-C compuesta por una disposición irregular o enredada de capas que son distribuidas al azar para crear espacios entre capas de diferentes formas y tamaños (5 a 25 Å).

### **Hidróxido de calcio.**

Sus cristales son también llamados portlandita y constituyen de 20 a 25 por ciento del volumen de los sólidos en la pasta hidratada. Es un compuesto con una estequiometría definida, Ca(OH)<sub>2</sub>. Tiende a formar grandes cristales con una morfología clara de prismas hexagonales. La morfología generalmente varía de no descriptible a haces de grandes placas y es afectada por el espacio disponible, la temperatura de hidratación y las impurezas presentes en el sistema. Comparado con el H-S-C, el potencial de contribución a la resistencia del hidróxido de calcio, debido a las fuerzas de Van der Waals es limitado como resultado de un área superficial considerablemente menor. También la presencia de una cantidad considerable de hidróxido de calcio en el cemento Pórtland hidratado tiene un efecto adverso en la durabilidad química frente a soluciones ácidas, debido a que la mayor solubilidad del hidróxido de calcio es mayor que la del H-S-C.

### **Sulfoaluminatos de calcio.**

Ocupan de 15 a 20 por ciento del volumen de los sólidos en la pasta hidratada, esto favorece en general la formación de hidrato bisulfato, C<sub>6</sub>AS<sub>3</sub>H<sub>32</sub>, también llamado etringita, con forma de cristales prismáticos en forma de aguja. La presencia del hidrato de monosulfato en el concreto de cemento Pórtland hace al concreto más vulnerable al ataque de sulfatos. La etringita contiene pequeñas cantidades de óxido de hierro, el cual puede sustituir al óxido de aluminio en las estructuras cristalinas.

### **Granos de clinker no hidratados.**

Dependiendo de la distribución de partículas del cemento anhidro y del grado de hidratación, algunos granos de clinker no hidratados pueden concentrarse en la microestructura de las pastas de cemento hidratadas, a un largo tiempo después de la hidratación.

## Huecos en la pasta de cemento hidratado.

Las dimensiones comunes de los elementos sólidos y de los huecos en la pch se muestran en la figura A1.11.

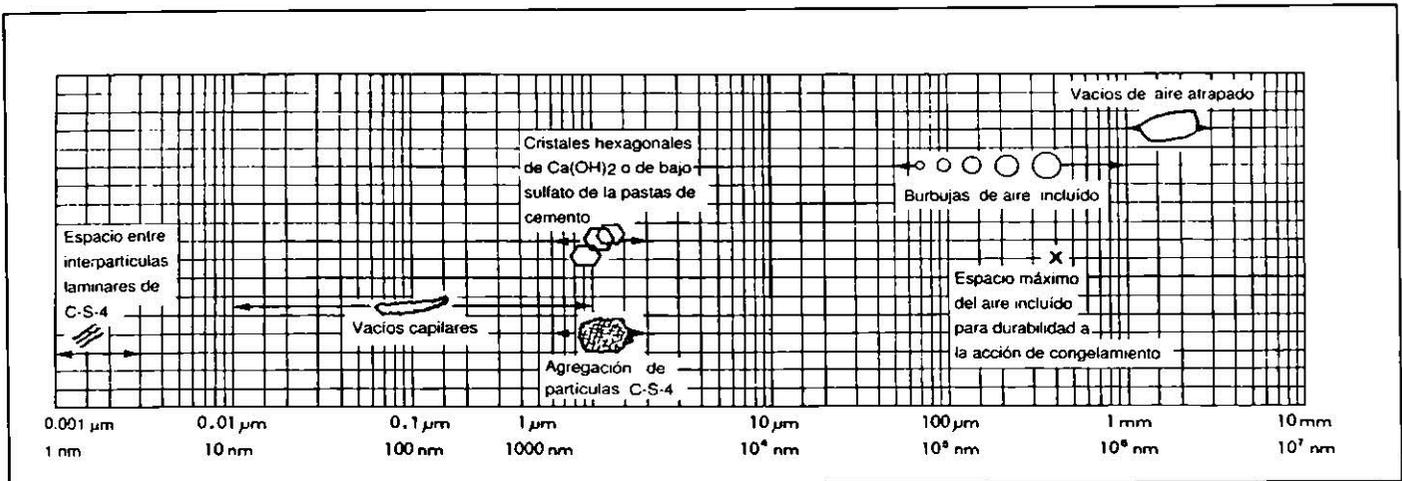


Figura A1.11.- Rango dimensional de sólidos y de poros en una pasta de cemento hidratada.

## Espacio entre capas en el H-S-C.

Powers supone que el ancho del espacio entre capas dentro de la estructura de H-S-C es de  $18\text{Å}$ ; Feldman y Sereda sugieren que el espacio puede variar de 5 a  $25\text{Å}$ . El agua en estos pequeños huecos puede ser retenida por adhesión del hidrógeno y su remoción bajo ciertas condiciones puede contribuir a la retracción por secado y al flujo plástico.

## Huecos capilares.

El espacio no ocupado por el cemento o por los productos de la hidratación consiste en huecos capilares, cuyo volumen y tamaño son determinados por la distancia original entre las partículas de cemento anhidro en la pasta de cemento fresca y el grado de hidratación del cemento.

La distribución de tamaño de los poros (figura A.12) es un criterio más adecuado para evaluar las características de los huecos capilares de pch mayores de  $50\text{nm}$ , llamados macroporos y considerados nocivos para la resistencia y a la impermeabilidad, los huecos menores de  $50\text{nm}$ , llamados microporos son considerados más importantes en la retracción por secado y en el flujo plástico.

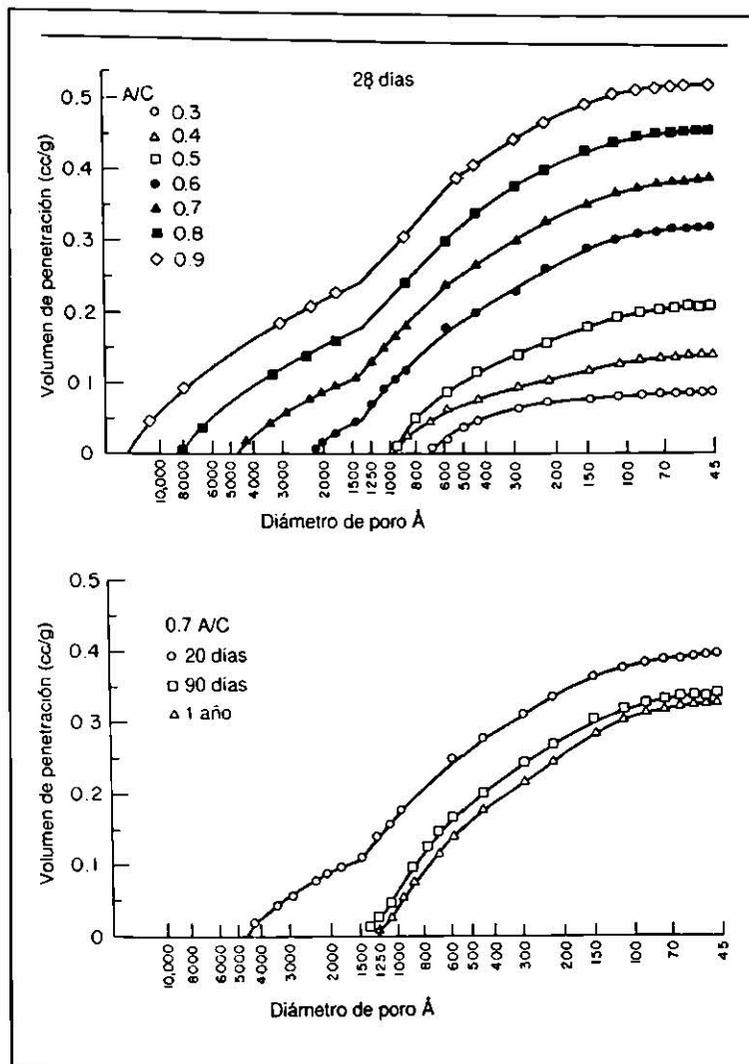


Figura A1.12.- Distribución de tamaños de poros en pastas de cemento hidratadas, ésta controla la resistencia, la permeabilidad y los cambios de volumen en una pasta de cemento endurecida. Es afectada por la relación agua/cemento y la edad de la hidratación del cemento.

### Huecos de aire.

Los huecos de aire son en general esféricos. El aire puede ser atrapado en la pasta fresca de cemento durante la operación del mezclado. Los huecos de aire atrapado pueden ser tan grandes como 3mm; los huecos de aire introducido generalmente varían de 50 a 200  $\mu\text{m}$ . Los huecos atrapados y los huecos de aire son mucho más grandes que los huecos capilares y son capaces de afectar adversamente su resistencia y su impermeabilidad.

## **Agua en la pasta de cemento hidratada.**

Dependiendo de la humedad del medio ambiente y de la porosidad de la pasta, la pasta de cemento no tratada es capaz de retener una gran cantidad de agua. La clasificación del agua en varios tipos se basa en el grado de dificultad o facilidad con la que se puede ser removida de la pch.

### **Agua capilar.**

Es el agua presente en los huecos mayores de 50 Å. Está libre de la influencia de las fuerzas de atracción ejercidas por la superficie sólida. Es conveniente dividir el agua capilar en dos categorías: el agua en los grandes huecos del orden de  $> 50 \text{ nm}$  ( $0.05 \mu\text{m}$ ), que puede considerarse agua libre ya que su remoción no causa cambio de volumen, y el agua retenida por la tensión capilar en las pequeñas capilaridades (5 a 50 nm), que al ser removida puede causar retracción del sistema.

### **Agua absorbida.**

Es el agua que está cercana a la superficie sólida. Se ha sugerido que hasta seis capas moleculares de agua (15 Å), pueden ser retenidas físicamente por la adhesión del hidrógeno. Una mayor parte del agua absorbida puede perderse por secado de la pch, con 30 por ciento de humedad relativa.

### **Agua entre capas.**

Es el agua asociada con la estructura de la H-S-C. Se ha sugerido que una capa de agua monomolecular entre las capas de H-S-C, es fuertemente retenida por la adhesión del hidrógeno. El agua entrecapas se pierde solamente por un fuerte secado. La estructura de H-S-C se contrae considerablemente cuando el agua entrecapas se pierde.

### **Agua químicamente combinada.**

Ésta agua no se pierde con el secado; aparece cuando los hidratos se descomponen por calentamiento. Con base al modelo Feldman-Sereda, en la figura A1.13 se ilustran diferentes tipos de agua asociados con el H-S-C.

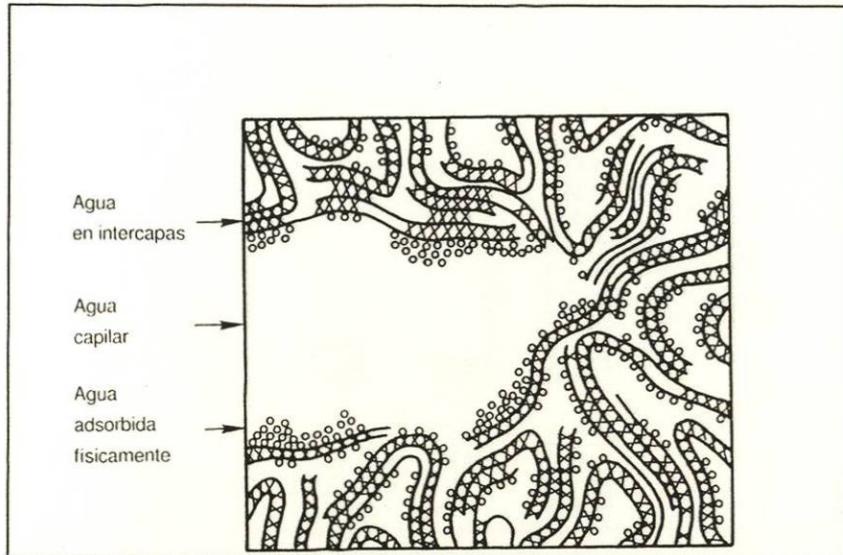


Figura A1.13.- Tipos de agua asociada con el hidrato de silicato de calcio.

### **Relaciones estructura/propiedades en la pasta de cemento hidratada.**

Las características deseables en la ingeniería para el concreto endurecido son: resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad.

#### **Resistencia.**

La fuente principal de resistencia en los productos sólidos de la pch es la existencia de fuerzas de atracción de Van der Waals. Estos productos de la hidratación del cemento Pórtland tienden a adherirse fuertemente no solo uno con otro, sino también a los sólidos de poca área superficial, los huecos son perjudiciales para la resistencia.

La concentración de esfuerzo y la subsecuente ruptura al aplicar la carga, comienza en los grandes huecos capilares y en las microgrietas que invariablemente están presentes.

En la figura A1.14 se muestra el proceso de reducción progresiva en la porosidad capilar, ya sea con el incremento del grado de hidratación (caso A) o con una disminución de las relaciones agua/cemento (caso B). Puesto que la relación agua/cemento se da generalmente por masa, es necesario conocer la densidad específica del cemento Pórtland (aproximadamente 3.14), con el fin de calcular el volumen del agua y el espacio total disponible, lo que es igual a la suma de los volúmenes de agua y de cemento.

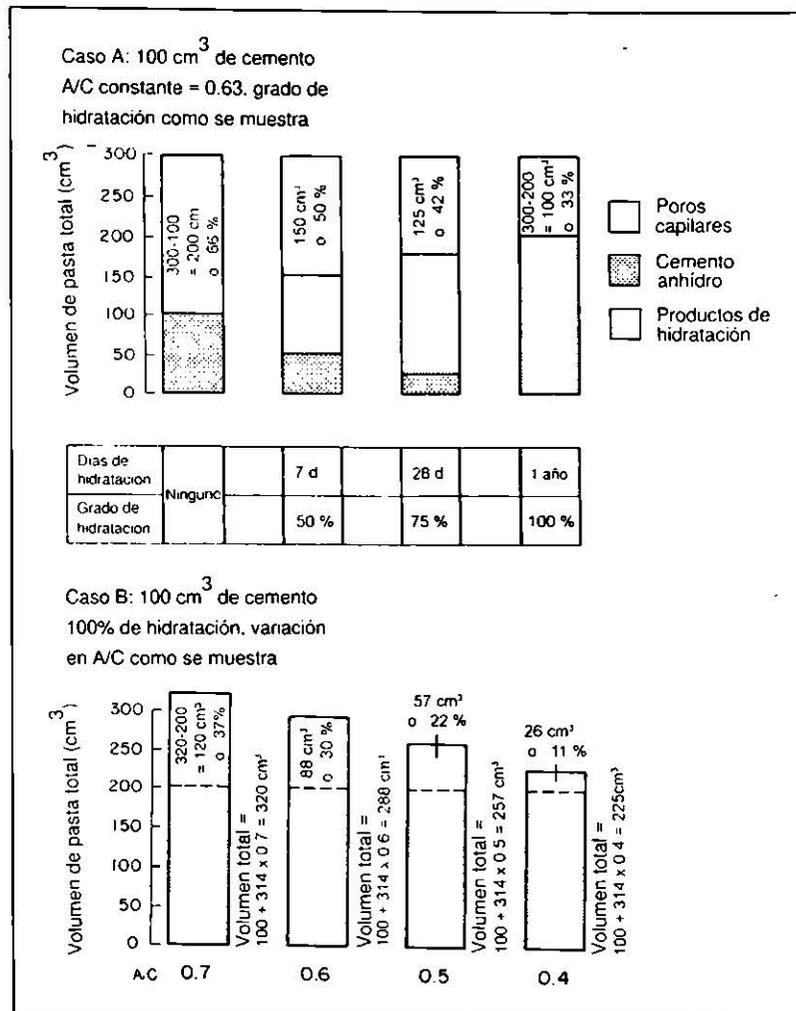


Figura A1.14.- Cambios en la porosidad capilar con diversas relaciones y grados de hidratación.

En la figura A1.15 se muestra la influencia de la relación agua/cemento y el grado de hidratación, sobre la resistencia y la permeabilidad.

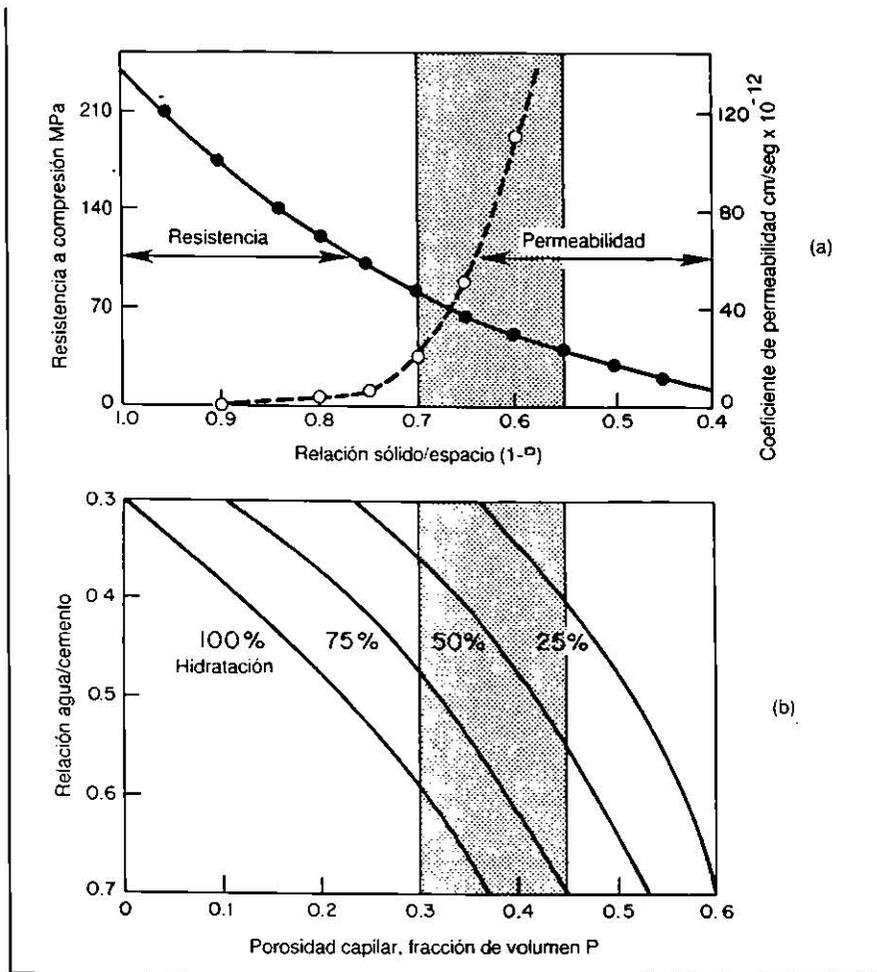


Figura A1.15.- Influencia de la relación agua/cemento y grado de hidratación, sobre la resistencia y la permeabilidad. Esto determina la porosidad de la pasta de cemento hidratada. El área sombreada muestra el rango típico de la porosidad capilar en pastas de cemento hidratadas.

### Estabilidad dimensional.

La pch saturada no es estable dimensionalmente. Cuando se exponga a la humedad del medio ambiente, que normalmente es mucho más baja del 100 por ciento, el material comenzará a perder agua y a retraerse. Puesto que el agua libre no está unida a la estructura de los productos de hidratación por adhesión alguna ni física ni química, su pérdida no será acompañada por una retracción (figura A1.16).

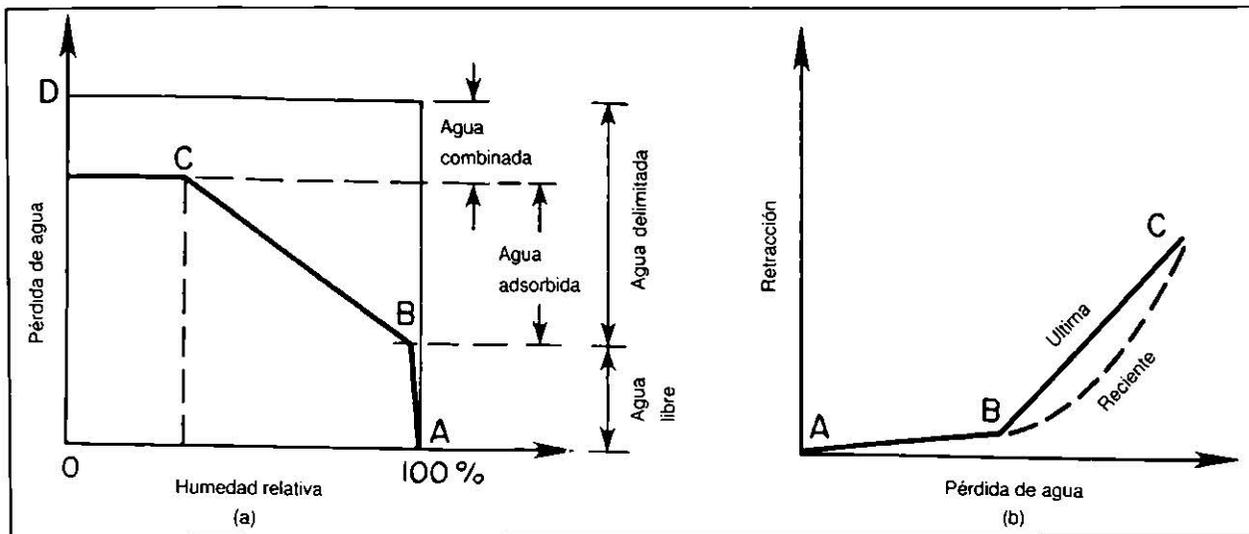


Figura A1.16.- a) Pérdida de agua como una función de la humedad relativa;  
 b) Retracción de un mortero de cemento como una función de la pérdida de agua.

Una pch saturada expuesta a una humedad relativa (HR) ligeramente menor del 100 por ciento, puede perder una cantidad considerable de agua total evaporable, antes de sufrir retracción alguna. Cuando la mayor parte del agua libre se ha perdido, al continuar el secado, se encuentra que una pérdida adicional de agua comienza a producir retracción considerable.

El contacto del agua entrecapas con la superficie sólida y la tortuosidad de la senda de transporte a través de la red capilar, su remoción tiende a inducir un esfuerzo de compresión en las paredes sólidas del poro capilar.

La retracción por secado también es responsable del flujo plástico de la pch.

### Durabilidad.

La pch es alcalina, por lo tanto su exposición a aguas ácidas es perjudicial para el material. La impermeabilidad es también llamada hermetismo al agua, se convierte en un factor principal para la determinación de la durabilidad, una pch impermeable producirá un concreto impermeable. La permeabilidad es definida como la facilidad con la que un fluido puede fluir a través de un sólido. El tamaño y la continuidad de los poros en la estructura del sólido determinan su permeabilidad.

La disminución de la porosidad total capilar estaba asociada con la reducción de los grandes poros en la pch (figura A1.17).

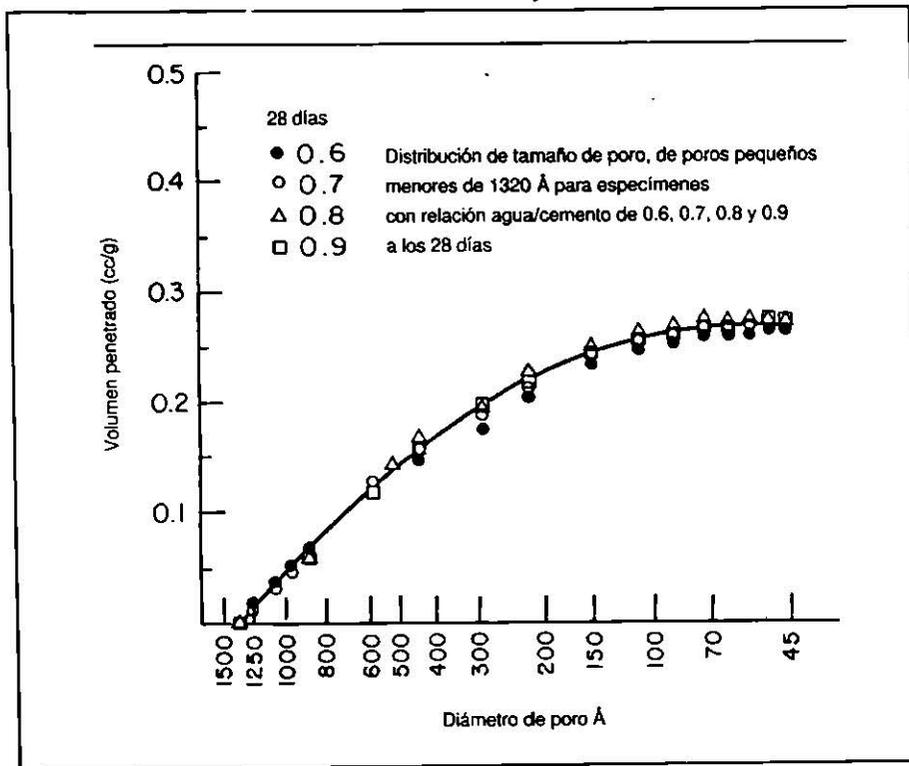


Figura A1.17.- Gráfica de distribución de poros pequeños en pastas de cemento de varias relaciones agua/cemento.

La permeabilidad de una pasta de cemento totalmente hidratada, puede ser del orden de  $10^6$  veces menor que la de una pasta joven.

### Zona de transición del concreto.

#### Estructura de la zona de transición.

En un concreto recientemente compactado, las partículas de agua se forman alrededor de las partículas del agregado grueso. Esto podría ser la causa de una relación agua/cemento más alta. Debido a la alta relación agua/cemento, estos productos cristalinos en la vecindad del agregado grueso están formados por cristales relativamente más grandes y por lo tanto forman un marco más poroso que en la masa de la pasta de cemento o en la matriz del mortero. Los cristales de hidróxido de calcio en forma de placas, tienden a formar capas orientadas.

Un diagrama representativo y una micrografía electrónica de barrido de la zona de transición en el concreto se muestran en la figura A1.18.

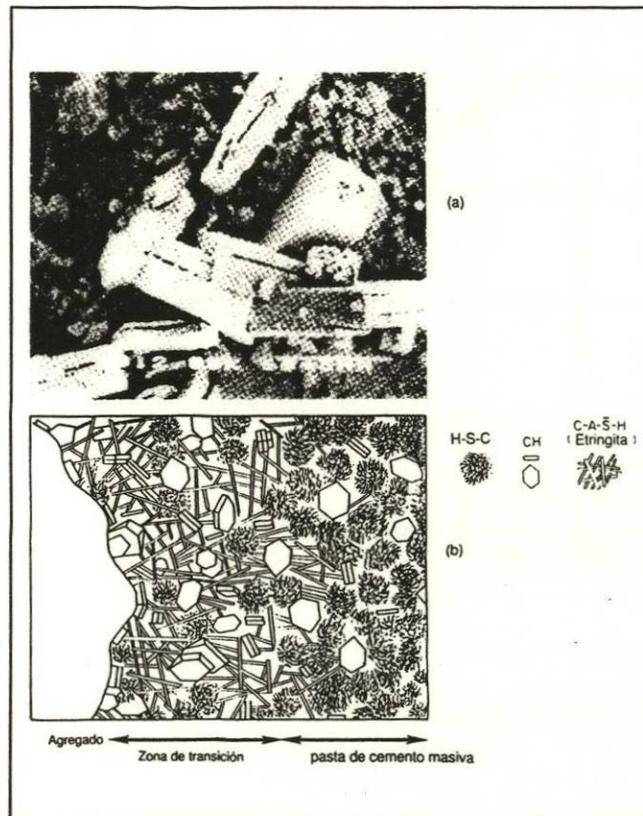


Figura A1.18.- a) Micrografía electrónica de barrido de cristales de hidróxido de calcio en la zona de transición. b) Representación gráfica de la zona de transición y de la pasta de cemento masiva en el concreto.

### Resistencia de la zona de transición .

Para un concreto con baja relación agua/cemento, a edades tempranas, el volumen y el tamaño de los huecos en la zona de transición será más grande que en la masa del mortero (figura A1.19). Con el incremento de la edad, la resistencia de la zona de transición puede igualarse o aún ser mayor que la resistencia de la masa del mortero.

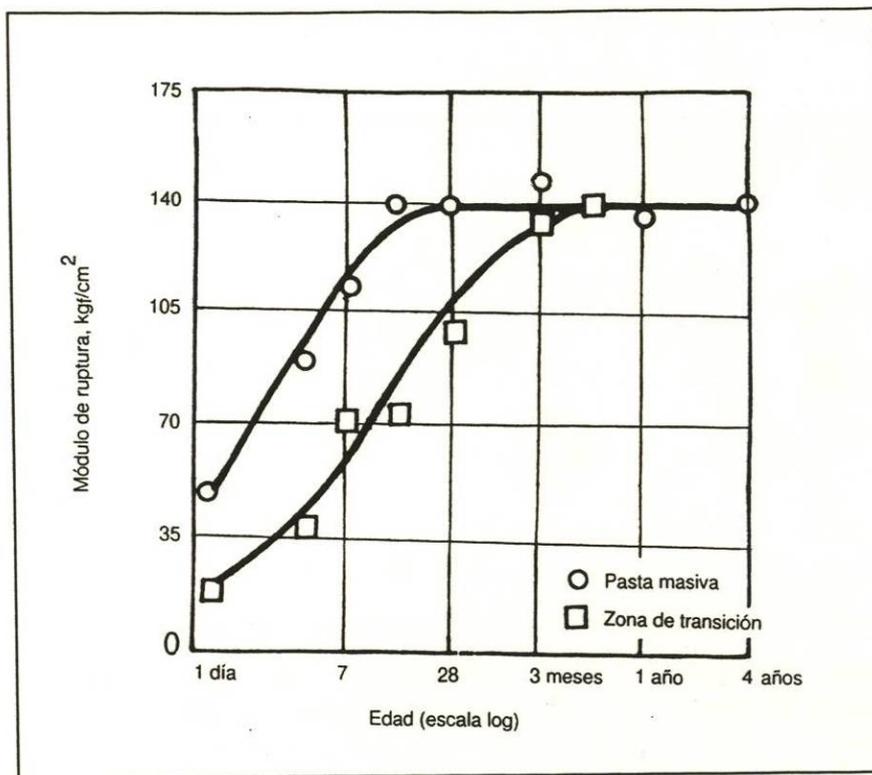


Figura A1.19.- Efecto de la edad en la resistencia a la adherencia (zona de transición) y en la resistencia de la pasta de cemento masiva.

Además del gran volumen de los huecos capilares y de los cristales de hidróxido orientados, el principal factor responsable de la pobre resistencia de la zona de transición en el concreto es la presencia de microgrietas. La cantidad de microgrietas depende de numerosos parámetros, incluyendo el tamaño del agregado y su granulometría, el contenido del cemento, la relación agua/cemento, el grado de compactación del concreto fresco, las condiciones de curado, la humedad del ambiente y la historia térmica del concreto.

El concreto tiene microgrietas en la zona de transición aún antes de que la estructura sea cargada. El impacto de las cargas a corto plazo, la retracción por secado y las cargas sostenidas a altos niveles de esfuerzo, tendrán el efecto de incrementar el tamaño y el número de las microgrietas (figura A1.20).



Figura A1.20.- Diagramas típicos de agrietamiento para concreto normal [resistencia media]. a) Después de la retracción por secado; b) Después de la carga a corto plazo; c) Para una carga sostenida durante 60 días al 65 por ciento de la resistencia a la compresión a 28 días. Como resultado de una carga a corto plazo, la retracción por secado y el flujo plástico, la zona de transición en el concreto tiene microgrietas.

### **Influencia en la zona de transición en las propiedades del concreto.**

La zona de transición, generalmente el eslabón más débil de la cadena, es considerada como la fase de resistencia límite del concreto.

A niveles de esfuerzo más altos, de aproximadamente 70 por ciento de la resistencia última, las concentraciones de esfuerzo en los grandes huecos de la matriz del mortero se vuelven suficientemente grandes para iniciar allí el agrietamiento. Con el incremento del esfuerzo, las grietas de la matriz se extienden gradualmente hasta que se unen a las grietas originadas en la zona de transición. El sistema de grietas se vuelve entonces continuo y el material se fractura.

Bajo cargas de tensión las grietas se propagan rápidamente y a un nivel de esfuerzo mucho menor.

Debido al microagrietamiento en la exposición del fuego, el módulo de elasticidad del concreto se abate más rápidamente que la resistencia a la compresión.

## **A2.- MÓDULO DE RUPTURA Y MÓDULO DE WEIBULL**

En el año 1939 Weibull publicó un trabajo fundamental que dio origen a la resistencia probabilística de los materiales, señaló que la explicación estaba en la aleatoriedad de las tensiones de ruptura y que éstas debían tratarse, en consecuencia como variables aleatorias que deberían seguir una determinada función de distribución de probabilidad. Mostró que la aleatoriedad se debía a defectos intrínsecos en el material, es decir, grietas en su interior. Como se conocen el número de grietas, su tamaño, ubicación y orientación, el fenómeno debe tratarse probabilísticamente. Griffith evidenció la importancia de las grietas en el fenómeno de ruptura y Weibull propuso que, dado el conocimiento de ellas en cuanto a su número, tamaño, ubicación y orientación es impreciso, entonces, la ruptura en los materiales frágiles debe regirse por las leyes de las probabilidades. Luego Weibull dedujo la celebre función de probabilidad que lleva su nombre.

### **Resistencia a la flexión.**

La resistencia a la flexión del concreto se utiliza generalmente al diseñar pavimentos y otras losas sobre el terreno. La resistencia a la compresión se puede utilizar como índice de la resistencia a la flexión, una vez que entre ellas se ha establecido la relación empírica para los materiales y el tamaño del elemento en cuestión. La resistencia a la flexión es también llamada módulo de ruptura [20].

El valor de la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de su resistencia a compresión. La resistencia a la torsión para el concreto está relacionada con el módulo de ruptura y con las dimensiones del elemento del concreto. La resistencia al cortante del concreto puede variar desde el 35% al 80% de la resistencia a la compresión. La correlación existe entre la resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, torsión, y cortante, de acuerdo a los componentes del concreto y al medio ambiente en que se encuentre.

### **Distribución Weibull.**

Además de que la distribución Weibull [21] es un modelo robusto y flexible, el mismo se ha aplicado en muchas áreas de la ingeniería para modelar eventos de confiabilidad y sobrevivencia. Como ejemplos de aplicaciones se encuentran las fallas por fatiga de materiales usados en la construcción de vehículos, aviones, barcos, pruebas aceleradas en los productos farmacéuticos; usualmente éstas pruebas permiten determinar la fecha de caducidad de los medicamentos.

La distribución de Weibull [22] se caracteriza por considerar la tasa de fallos variable, siendo utilizada por su gran flexibilidad, al poder ajustarse a una gran variedad de funciones de fiabilidad de dispositivos o sistemas.

Esta distribución complementa a la distribución exponencial y a la normal, que son casos particulares de la Weibull. A causa de su mayor complejidad sólo se usa cuando se sabe de antemano que una de ellas es la que mejor describe la distribución de fallos o cuando se han producido muchos fallos (al menos 10) y los tiempos correspondientes no se ajustan a una distribución más simple. En general es de gran aplicación en la mecánica.

Existen dos tipos de soluciones analíticas de la distribución Weibull que son: el método de los momentos y el método de máxima verosimilitud; ninguno de estos dos se suele aplicar debido a su complejidad. En su lugar se utiliza la resolución gráfica a base de determinar un parámetro de origen ( $t_0$ ). Un papel especial para gráficos, llamado papel de Weibull, hace esto posible. El procedimiento gráfico, aunque exige varios pasos y una o dos iteraciones, es relativamente directo y requiere principalmente álgebra sencilla.

La distribución de Weibull nos permite estudiar cual es la distribución de fallos de un componente clave de seguridad que pretendemos controlar y que a través de nuestro registro de fallos observamos que éstos varían a lo largo del tiempo y entro de lo que se considera tiempo normal de uso. El método no determina cuáles son las variables que influyen en la tasa de fallos.

### Características generales.

La tasa de fallos se puede escribir en función de la fiabilidad, de la siguiente forma:

$$\lambda(t) = - \frac{d[R(t)]}{F(t)} \quad (2.12)$$

ó,

$$R(t) = \exp [- \int \lambda(t) dt];$$

siendo:

$\lambda(t)$  = Tasa de fallos.

$R(t)$  = Fiabilidad.

$F(t)$  = Inviabilidad o función acumulativa de fallos.

$t$  = tiempo.

En 1951 Weibull propuso que la expresión empírica más simple que podía representar una gran variedad de datos reales podía obtenerse escribiendo:

$$\int \lambda(t) dt = \left( \frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \quad (2.13)$$

por lo que la fiabilidad será:

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2.14)$$

Siendo:

$t_0$  = Parámetro inicial de localización.

$\eta$  = Parámetro de escala o vida característica.

$\beta$  = Parámetro de forma.

Se ha demostrado que gran cantidad de representaciones de fiabilidades reales pueden ser obtenidas a través de ésta ecuación.

La distribución de Weibull se representa normalmente por la función acumulativa de distribución de fallos  $F(t)$ :

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2.15)$$

Siendo la función densidad de probabilidad:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[ - \left( \frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (2.16)$$

La tasa de fallos para esta distribución es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (2.17)$$

Las ecuaciones 2.15, 2.16 y 2.17 sólo se aplican para valores de  $(t - t_0) \geq 0$ . Para valores de  $(t - t_0) < 0$ , las funciones de densidad y la tasa de fallos valen 0. Las constantes que aparecen en las expresiones anteriores tienen una interpretación física:

$t_0$  = Es el parámetro de posición (unidad de tiempos), cero vida mínima; y define el punto de partida u origen de la distribución.

$\eta$  = Es el parámetro de escala, extensión de la distribución a lo largo, del eje de los tiempos. Cuando  $(t - t_0) = \eta$ , la fiabilidad viene dada por:

$$R(t) = \exp - (1)^\beta = 1/\exp 1^\beta = 1 / 2.718 = 0.368 = 36.8\%$$

Entonces la constante representa también el tiempo, medido a partir de  $t_0 = 0$ , según lo cual dado que  $F(t) = 1 - 0.368 = 0.632$ , el 63.2% de la población se espera que falle, cualquiera que sea el valor de  $\beta$  ya que el valor de éste no influye en los cálculos realizados. Por ésta razón también se le llama usualmente vida característica.

$\beta$  = Es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta describiendo el grado de variación de la tasa de fallos.

Las variaciones de la densidad de probabilidad, tasa de fallos y función acumulativa de fallos en función del tiempo para los distintos valores de  $\beta$ , están representados en la figura A2.1.

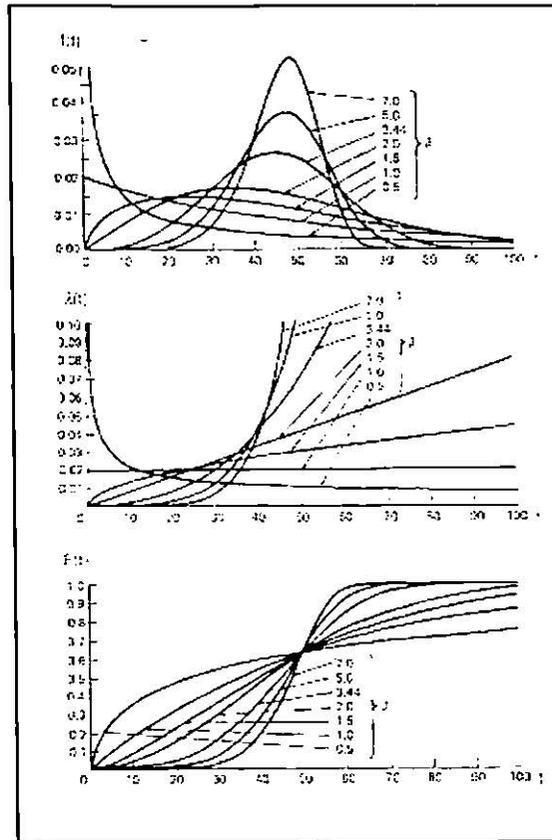


Figura A2.1. Variación de la densidad de probabilidad  $f(t)$ , tasa de fallos  $\lambda(t)$ , y la función acumulativa de fallos  $F(t)$  en función del tiempo para distintos valores del parámetro de forma  $\beta$ .

### Representación de los modos de fallo mediante la distribución Weibull.

En el estudio de la distribución se pueden dar las siguientes combinaciones de los parámetros de Weibull con mecanismos de fallo particulares:

a)  $t_0 = 0$

El mecanismo no tiene una duración de fiabilidad intrínseca, y:

- a. Si  $\beta < 1$ , la tasa de fallos disminuye con la edad sin llegar a cero, por lo que se supone encontrar en la juventud del componente con un margen de seguridad bajo, dando lugar a fallos por tensión de rotura.
- b. Si  $\beta = 1$ , la tasa de fallo se mantiene constante siempre; lo que indica una característica de fallos aleatoria o pseudoaleatoria. En este caso la distribución Weibull es igual a la exponencial.
- c. Si  $\beta > 1$ , la tasa de fallo se incrementa con la edad de forma continua, lo que indica que los desgastes empiezan en el momento en que el mecanismo se pone en servicio.

- d. Si  $\beta = 3.44$ , se cumple que la media es igual a la mediana y a distribución de Weibull es sensiblemente igual a la forma.

b)  $t_0 > 0$

El mecanismo es intrínsecamente fiable desde el momento en que fue puesto en servicio hasta que  $t = t_0$ , y además:

- a. Si  $\beta < 1$ , hay fatiga u otro tipo de desgaste en el que la tasa de fallo disminuye con el tiempo después de un súbito incremento hasta  $t_0$ ; valores de  $\beta$  bajos ( $\approx 0.5$ ) pueden asociarse con ciclos de fatigas bajos y los valores de  $\beta$  elevados ( $\approx 0.8$ ) con ciclos más altos.
- b. Si  $\beta > 1$ , hay una erosión o desgaste similar e la que la constante de duración de carga disminuye continuamente con el incremento de la carga.

c)  $t_0 < 0$

Indica que el mecanismo fue utilizado o tuvo fallos antes de iniciar la toma de datos, de otro modo:

- a. Si  $\beta < 1$ , podría tratarse de un fallo de juventud antes de su puesta en servicio, como resultado de un margen de seguridad bajo.
- b. Si  $\beta > 1$ , se trata de un desgaste por una disminución constante de la resistencia iniciado antes de su puesta en servicio, por ejemplo, debido a una vida propia limitada que ha finalizado o era inadecuada.

### **A3.- FOTOGRAMETRÍA**

Los principios de fotogrametría están a su vez basados en principios fundamentales de geometría que Pitágoras documentada por primera vez en el año 450 A.C.

El método procede a medir la diferencia de paralaje entre las imágenes en estéreo, es decir, las imágenes del mismo sitio vistas desde distintas direcciones. Paralaje es el cambio aparente en la posición de un objeto causado por el cambio real del punto de observación.

La fotogrametría [23], regida por principios y leyes matemáticas, basa su método para calcular la forma y dimensiones de un objeto, en el uso de las fotografías. A partir de dos fotografías de un mismo objeto tomadas desde posiciones diferentes, aplicando las reglas de la geometría proyectiva se obtiene la estereoscopia del objeto permitiendo su modelado, estudio y descripción sin necesidad de tenerlo a él presente.

El amplio empleo de la fotogrametría [24] en la vida cotidiana esta basado en las siguientes cualidades positivas de ésta:

1. Alta exactitud de las mediciones al tomar las fotografías con cámaras muy precisas y elaborarlas empleando métodos rigurosos en equipos de gran precisión basados en tecnologías computarizadas.
2. Gran productividad del trabajo, las mediciones se realizan directamente en las imágenes fotográficas independientemente de la accesibilidad y de las inclemencias del tiempo.
3. Completa objetividad y confiabilidad de los resultados de las mediciones.
4. Posibilidad de obtener en poco tiempo la información sobre el objeto o sus partes.

Las distorsiones de las fotografías se corrigen utilizando un aparato denominado restituidor fotogramétrico. Este proyector crea una imagen tridimensional al combinar fotografías superpuestas del mismo terreno tomadas desde ángulos diferentes.

El levantamiento fotogramétrico es la aplicación de la fotogrametría a la Topografía. La fotogrametría [25] no es una ciencia nueva, ya que los principios matemáticos en que se basa son conocimientos desde hace más de un siglo, sin embargo sus aplicaciones topográficas son mucho más recientes. Las aplicaciones de la fotogrametría, no son solo topográficas, que es una eficaz ayuda en medicina legal y criminalista, así como en investigaciones policíacas, en escultura y arquitectura que se valen de ella para la reproducción y medida de cuerpos y objeto diversos. Gracias a ésta se pudo reconstruir muchos monumentos destruidos durante las guerras mundiales, entre ellos la celebre catedral de Reims.

También se utiliza la fotogrametría en meteorología; astronomía balística, geología, hidráulica, etc.

### **Etapas de la fotogrametría.**

En la historia de la fotogrametría se pueden distinguir tres etapas: la fotogrametría ordinaria, la estéreo fotogrametría analítica y la estéreo fotogrametría automática.

Ya antes del invento de la fotografía, Lambert, matemático, físico y filósofo de origen francés, estableció en 1759 los fundamentos para resolver el problema de la restitución perspectiva. A partir de 1858 el francés Laussedat, consiguió obtener planos exactos de edificios y pequeñas extensiones de terreno a partir de la fotografía, siendo este el primer inicio de la fotogrametría, que en su día se conoció con el nombre de fotogrametría ordinaria.

Este método tuvo en vigor hasta el principio del presente siglo; el inconveniente más grande que tenía éste sistema era a la identificación de un mismo punto en dos fotografías tomadas desde distintos puntos de vista.

Aunque se continuaba trabajando con la fotogrametría con la fotogrametría, se tropezaba con dificultades de importancia, ya que la restitución de un punto implicaba una gran cantidad de cálculos, hasta que en 1901 Pulfrich aplicó el principio de la visión en relieve para efectuar medidas estereoscópicas por medio de un aparato de su invención que se denominó estéreocomparador, y con el cual se deducían las coordenadas punto por punto; dando comienzo a la segunda etapa.

En 1909 se dio el paso definitivo para la consagración de la fotogrametría terrestre, gracias al teniente Austriaco Von Orel al construir el aparato denominado estéreo-autógrafo, primer aparato utilizado para la construcción y dibujo automático de planos, en el caso de ejes ópticos horizontales.

La tercera etapa comienza con el desarrollo de la aviación y la necesidad de los beligerantes de ambos bandos de la primera guerra mundial de obtener fotografías aéreas del campamento contrario. En la fotogrametría aérea la cámara está en movimiento, y para poder efectuar la restitución, es preciso conocer el punto exacto en que se impresionó el fotograma.

Para solucionar este obstáculo después de diversos ensayos, se tuvo que volver al antiguo teorema de Terrero-Hauck, permitió conseguir la orientación relativa de cada dos fotografías consecutivas por método exclusivamente óptico y mecánicos.

La fotogrametría no ha eliminado a la topografía, por el contrario, a pesar de los avances realizados en los métodos fotogramétricos para eliminar las operaciones topográficas que sirven de base a los levantamientos de la fotogrametría, esta base que enlaza el terreno con la cámara fotogramétrica ha de existir.

### **Pares estereoscópicos.**

Un par estereoscópico [26] se compone de dos imágenes de una misma zona, tomadas bajo dos ángulos diferentes y que aseguran una relación base/altura mínima de 0.5.

Su uso requiere un software de procesamiento de imágenes especializado. Permiten crear modelos digitales de elevación (MDE) y ortoimágenes utilizadas en numerosos campos.

### **Exageración visual.**

La exageración vertical [27] es la diferencia entre las relaciones de la base de la proyección de la imagen (distancia entre los puntos de toma de las imágenes) a la altura de vuelo y la base de la visión estérea a la altura desde la cual el estéreo modelo es visto usando algún dispositivo de visión estereoscópica. En los siguientes gráficos la primera relación se representa como  $Bn/Hn$ , en tanto la segunda como  $Bs/Hs$ .

$Bn/Hn$  (figura A3.1) es la relación de la base aérea (distancia entre los dos puntos de toma de imagen) a la altura de vuelo sobre el geoide.  $Bs/Hs$  (figura 3.2) es la relación de la base ocular a la distancia desde los ojos a la cual el modelo estéreo es visto.

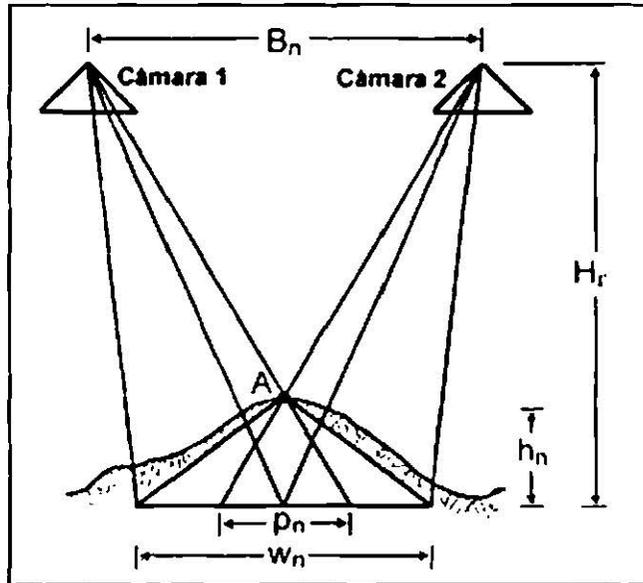


Figura A3.1.- Exageración vertical - geometría de imagen donde  $B_n$  es la base aérea,  $H_n$  es la altura de vuelo;  $W_n$  es la amplitud del objeto,  $p_n$  es el paralaje del punto "A" debido a la elevación  $H_n$ , y  $h_n$  es la altura del objeto. [27]

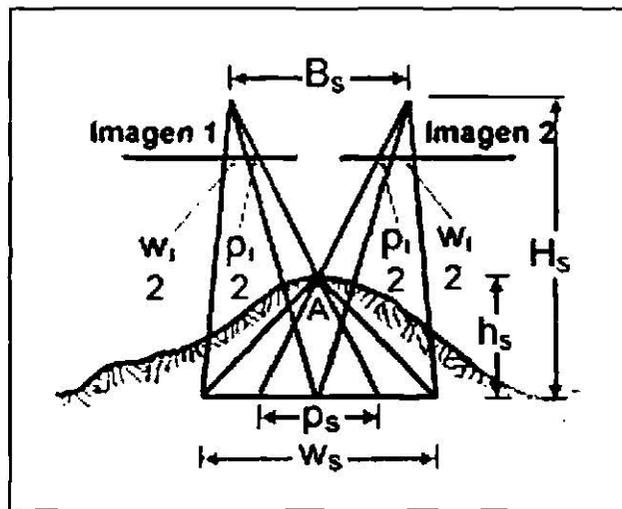


Figura A3.2.- Exageración vertical - geometría de vista estéreo donde  $B_s$  es la base del par estéreo,  $H_s$  es la altura de visión en estéreo;  $W_s$  es la amplitud aparente del objeto,  $\frac{W_i}{2}$  es la mitad de  $W_s$  medido en la imagen,  $h_s$  es la altura aparente de "A";  $p_s$  es el paralaje aparente del punto "A", y  $\frac{P_i}{2}$  es la mitad de  $p_s$  medido en la imagen. [27]

### **Integración de imágenes.**

Matemáticamente, una imagen es la representación del espacio tridimensional en un medio 2D. La visión de imágenes de la superficie de la tierra en estereoscopia provee a los intérpretes una información más cualitativa y más cuantitativa que una sola imagen. Los cartógrafos, ingenieros, silvicultores, geólogos, hidrologistas y otros científicos han utilizado tradicionalmente la visión estérea en su trabajo.

Un modelo estéreo puede contener la información sobre pendientes, la dimensión de formas de la tierra y elevaciones mucho más claramente que una representación 2D. Además, los modelos estéreos pueden mostrar relaciones entre las formas del terreno y la vegetación, los afloramientos minerales o los sistemas de drenaje que no son obvios con una sola imagen.

### **Estereoscopio.**

Instrumento óptico a través del cual pueden observarse fotografías de objetos, pero no como representaciones planas, sino con apariencia sólida y profundidad. Es un instrumento donde se presentan al mismo tiempo dos fotografías del mismo objeto, una a cada ojo. Las dos fotografías están tomadas desde ángulos ligeramente diferentes y se observan a través de dos objetivos con lentes separadas e inclinadas para que coincidan y se fundan las dos imágenes en una tridimensional.

La fotografía estereoscópica [28] aérea permite realizar representaciones en tres dimensiones que pueden utilizarse en la preparación de mapas de relieve.

### **Paralaje.**

Para ver un par de imágenes de fotografías aéreas (figura A3.3), imágenes de satélite o cualquier otra clase de imágenes en forma estérea se necesita la presencia de paralaje en  $X$  y de los ángulos paralácticos.

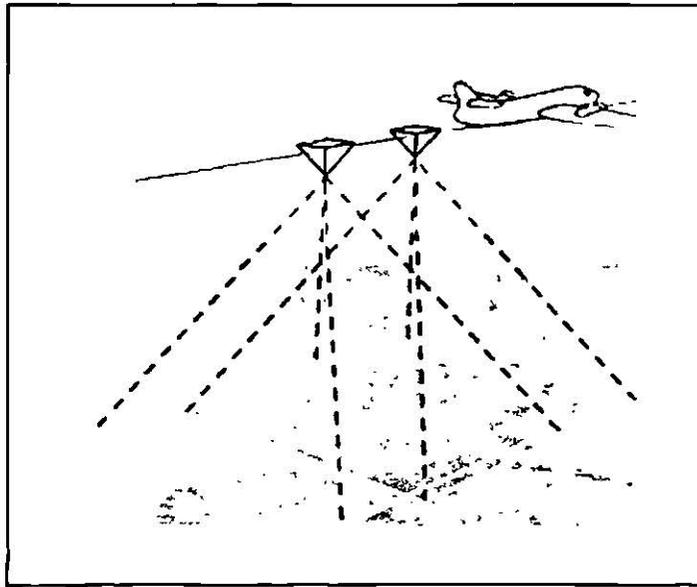


Figura A3.3.- Simulación de un tipo de fotografía aérea. [27]

### **Paralaje en $X$ .**

La paralaje  $X$  [27], que también se conoce como paralaje estereoscópico, es causado por una rotación en la posición de la observación. Para generar un par estéreo de fotos aéreas, una cámara fotográfica a bordo de un avión toma fotos de la tierra en diversas horas y diversas posiciones. Para generar un par estéreo de imágenes de satélite se necesita que los datos sean recogidos desde dos ángulos o posiciones de vista distintas. El cambio en los puntos de observación causa una rotación aparente en la posición de un objeto con respecto a la imagen de referencia (que debe ser la de ángulo más bajo, para el caso del radar).

Dos aspectos fundamentales a tener en cuenta en el paralaje estereoscópico son:

1. El paralaje de cualquier punto se relaciona directamente con la elevación de ese punto.
2. El paralaje es mayor para elevaciones más altas que para elevaciones bajas, manteniendo un ángulo de vista constante como se muestra en la figura A3.4.

Estas dos relaciones permiten hacer medidas de elevación a través de un par estéreo.

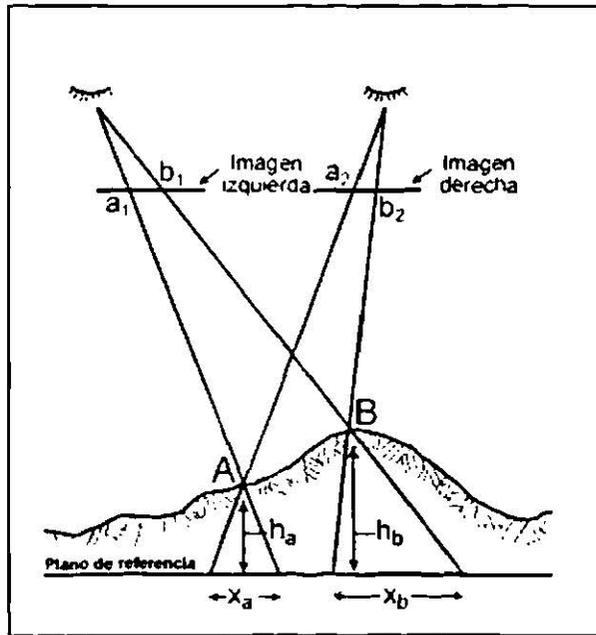


Figura A3.4.- Paralaje estereoscópico donde: *A* representa el punto arbitrario en superficie tierra, a una elevación baja, *B* es el punto arbitrario en la superficie tierra, a una elevación alta;  $a_1$  y  $b_1$  son los puntos "A" y "B" como reflejados en la imagen izquierda,  $a_2$  y  $b_2$  es la punta "A" y "B" como reflejados en la imagen derecha;  $X_a$  representa el paralaje en  $X$  debido a la elevación del punto "A" sobre el plano de referencia,  $X_b$  representa el paralaje en  $X$  debido a la elevación del punto "A" sobre el plano de referencia,  $h_a$  es la altura del punto "A" sobre el plano de referencia y  $h_b$  es la altura del punto "B" sobre el plano de referencia.  
[27]

### Ángulo paraláctico.

El ángulo paraláctico [27] (figura A3.5), también conocido como ángulo de convergencia, es formado por la intersección de la línea de vista del ojo izquierdo con la línea de vista del ojo derecho. El punto más cercano a los ojos de estas intersecciones tiene el ángulo de convergencia más grande. El cerebro percibe la altura de un objeto asociando la profundidad en su tapa y su base a los ángulos de convergencia que se forman viendo la tapa y la base. El paralaje de  $X$  y el ángulo paraláctico están relacionados. Mientras que el paralaje de  $X$  aumenta, también lo hace el ángulo paraláctico.

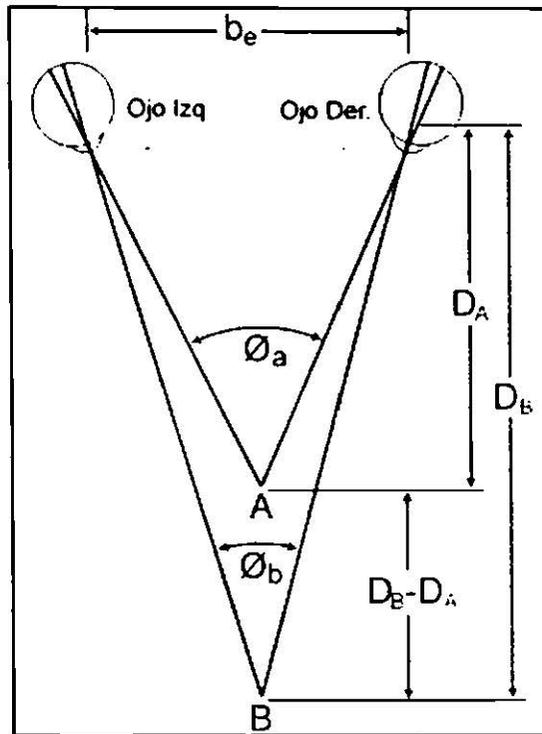


Figura A3.5.- Ángulo paraláctico donde: *A* es el punto arbitrario a una elevación alta, *B* es el punto arbitrario a una elevación baja,  $\theta_a$  es el ángulo de convergencia más grande para un punto de alta elevación;  $\theta_b$  representa el ángulo de convergencia más pequeño para un punto de baja elevación,  $D_A$  es la distancia vertical aparente al punto "A",  $D_B$  es la distancia vertical aparente al punto "B" y " $D_B - D_A$ " representan la diferencia en distancia vertical aparente de los puntos "A" y "B". [27]

### Paralaje en Y.

El paralaje de Y [27] está presente en muchos pares estéreos. Es la diferencia en distancias entre dos imágenes de un punto contenido en el plano vertical que contiene la base aérea. Puede ser causado por la inclinación de una o ambas imágenes respecto a un sistema de referencia exterior. La inclinación (figura A3.6) puede ocurrir como resultado del desvío del avión. El paralaje de Y se puede causar también por una variación en alturas de vuelo (figura 3.7) o si las imágenes se imprimen en escalas levemente diferentes. Finalmente, el paralaje de Y puede ocurrir si el espectador pone en línea (figura A3.8).

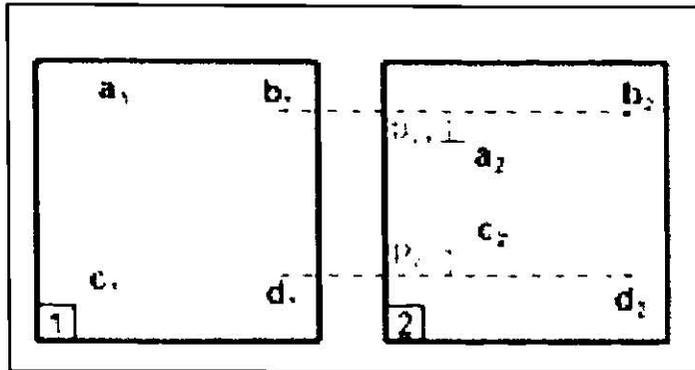


Figura A3.6.- Paralaje  $Y$  debido a la inclinación donde:  $a_1, b_1, c_1, d_1$  representan los puntos arbitrarios en una imagen;  $a_2, b_2, c_2, d_2$ , representan los puntos correspondientes en la otra imagen con inclinación,  $P_{ya}$  es el paralaje en  $Y$  del punto "a" debido a la inclinación y  $P_{yc}$  es el paralaje en  $Y$  del punto "c" debido a la inclinación. [27]

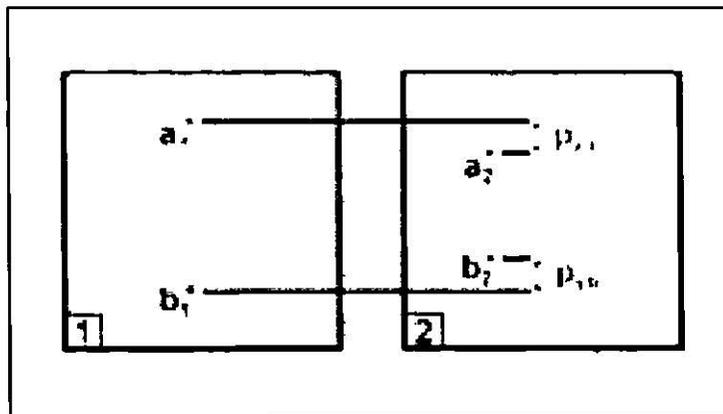


Figura A3.7.- Paralaje  $Y$  debido a la variación en alturas de vuelo, donde se expresan  $a_1$  y  $b_1$ , como los puntos arbitrarios en una imagen,  $a_2$  y  $b_2$  como los puntos correspondientes en la otra imagen con diferente escala,  $P_{ya}$  es el paralaje en  $Y$  del punto "a" debido a la diferencia en escala, y  $P_{yb}$  es el paralaje en  $Y$  del punto "c" debido a la diferencia en escala. [27]

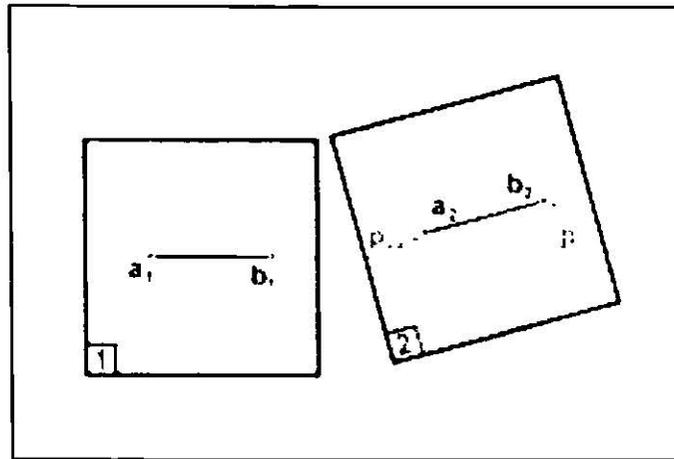


Figura A3.8.- Paralaje  $Y$  debido a la alineación, donde:  $a_1$  y  $b_1$  son los puntos arbitrarios en una imagen,  $a_2$  y  $b_2$  son los puntos correspondientes en la otra imagen no alineada,  $P_{ya}$  es el paralaje en  $Y$  del punto "a" debido a la pérdida de alineación y  $P_{yb}$  es el paralaje en  $Y$  del punto "c" debido a la pérdida de alineación. [27]

### Visión estereoscópica.

Los seres humanos y otros animales son capaces de enfocar los dos ojos sobre un objeto, lo que permite una visión estereoscópica [27], fundamental para percibir la profundidad. El principio de la visión estereoscópica puede describirse como un proceso visual relacionado con el uso de un estereoscopio, el cual muestra una imagen desde dos ángulos ligeramente diferentes, que los ojos funden en una imagen tridimensional única.

Utilizando pares de imágenes de radar se genera de la misma forma que en fotogrametría convencional, la visión estereoscópica (figura A3.9). El control del posicionamiento en la imagen permite cancelar el paralaje en  $Y$ , de ésta manera el operador suprime el paralaje en  $X$ , fusionando las marcas flotantes y midiendo el paralaje bidimensional entre las dos imágenes para cada punto.



Figura A3.9.- Forma en que se genera la visión estereoscópica. [27]

La visión estereoscópica impide la propagación del error de paralajes artificiales de las coordenadas de los puntos de control (GCP). Por otro lado, la utilización de imágenes estéreo facilita el proceso de identificación de algunas características tales como: puntos de control sobre el dosel del bosque, ríos, cuencas, etc. En el método estereoscópico, la extracción planimétrica de características es independiente de la altimetría.

La escogencia del par estéreo depende de la aplicación del usuario final, F2/F5 para mapeo de vías, por ejemplo y S4/S7 para geomorfología de una gran zona como se muestran en la figura A3.10.



Figura A3.10.- Aplicación del usuario en mapeo de vías y geomorfología de gran zona. [27]

### **La visión de fotografías estereoscópicas.**

El principal problema es la forma de observar las fotografías, de manera que cada ojo vea solamente la imagen que le corresponde. Los visores o estereoscopios permiten una visión casi perfecta pero individual. Los sistemas empleados en la proyección de películas y diapositivas permiten ver imágenes tridimensionales a un grupo numeroso de personas, pero les obliga a portar gafas especiales. Existen sistemas de visión libre, como el lenticular, que permiten ver fotografías en papel, pero su calidad no es demasiado buena. Todo esto ha relegado siempre la fotografía 3D al campo de los profesionales que precisan de ella, al cine, con muy poca incidencia, y al aficionado como una mera curiosidad. Existen diversos sistemas de visualización.

Actualmente se dispone de medios técnicos suficientes para presentar imágenes 3D de gran calidad.

### **Mediciones estereoscópicas de las imágenes.**

El paralaje de un punto se puede medir visualizando estereoscópicamente, con la ventaja de una mayor rapidez y exactitud, debido a que se utiliza visión binocular. Cuando el observador mira por el estereoscopio, dos pequeñas marcas idénticas gravadas en láminas de vidrio transparente, llamadas medios índices, se colocan sobre cada fotografía. El observador ve simultáneamente una marca con el ojo izquierdo y la otra con el ojo derecho; luego se ajusta la posición de las marcas hasta que parecen confundirse o fusionarse en una sola, percibiéndose a una cierta altura. Conforme se varía el espaciamiento de las medias marcas, la altura de la marca fusionada parecerá fluctuar o "flotar", dándose el nombre de índice flotante.

### **Fotografía estereoscópica.**

La fotografía estereoscópica [29], también denominada abreviadamente fotografía 3D, intenta reproducir la sensación de profundidad de la visión estereoscópica natural.

Existen diversidad de sistemas, unos más complejos que otros, que introducen unas dificultades adicionales a las de la fotografía normal, a veces difíciles de soslayar. De hecho hubo un tiempo en que se vendieron cámaras 3D (figura A3.11) y este tipo de fotografía se hizo muy popular, pero decayó debido a las dificultades con que se encontraba el fotógrafo aficionado a la hora de visionar las imágenes.

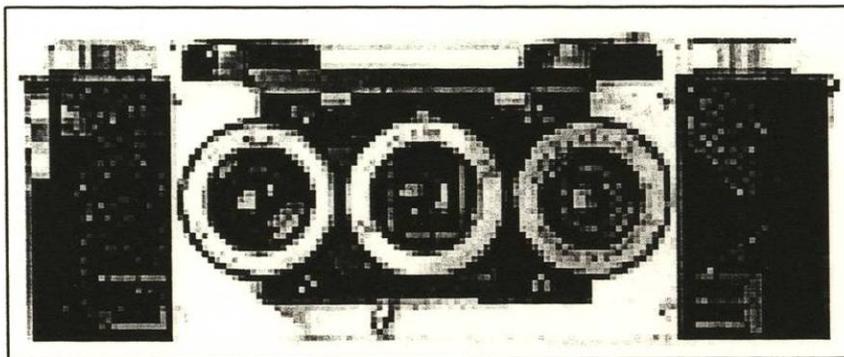


Figura A3.11.- Tipo de cámara utilizada para tercera dimensión (3D). [29]

### **La Cámara fotográfica.**

En fotogrametría terrestre se opera con cámaras fotográficas montadas sobre un teodolito o taquímetro, con lo que obtiene el fototeodolito, fototaquímetro o el fotogrametro, puede tener también antejo estadimétrico.

Al igual que los teodolitos, estos aparatos van provistos de los correspondientes tornillos de presión y de coincidencia, para lograr una perfecta puntería al punto visado, y como el antejo es solidario a la cámara fotográfica con ambos se visa el mismo punto.

El antejo del teodolito tiene un aumento de 28 veces y un objetivo de gran abertura y enfoque interno, que se realiza haciendo girar el manguito de enfoque situado alrededor del tubo del antejo.

La cámara fotográfica tiene una distancia focal de 165 Mm.; el tamaño de las placas de cristal que utiliza es de 100 x 150 mm.

Las cámaras fotogramétricas que se emplean para tomar fotografías desde los aviones son pocas parecidas a las ordinarias, estando todos sus elementos adaptados al trabajo especial que realizan. Se dividen en dos grandes grupos: cámaras de mano y cámaras automáticas; las primeras se emplean cuando solo se necesitan vistas aisladas o muy poco seguidas y las segundas cuando hay que hacer un gran número de fotografías seguidas.

Las cámaras automáticas, llamadas cinematográficas o toposeriografos, son las verdaderas cámaras fotogramétricas aéreas, van situada sobre el piso del avión por intermedio de una suspensión antivibrante y llevan una serie de dispositivos para que las operaciones propias de obtención de fotografía se realicen de un modo automático.

Las cámaras fotogramétricas aéreas están constituidas por las cámaras propiamente dichas, un almacén de negativos y un dispositivo de mando.

Para distinguir mejor determinadas especies de árboles cuando se trata de hacer el censo de las existencias forestales, se puede aplicar la fotografía por rayos infrarrojos.

### **Dispositivos especiales para fotografías estereoscópicas.**

Para obtener un par estéreo pueden emplearse diferentes procedimientos. Con una sola cámara podemos obtener las dos imágenes, en dos tiempos, desplazando la cámara una distancia similar a la de separación de los ojos, unos 65 mm. Naturalmente, el sujeto no debe moverse entre las dos tomas, por lo cual éste procedimiento sólo sirve para fotografiar objetos inmóviles. Si queremos obtener fotografías 3D en movimiento debemos emplear una cámara estéreo especial, una cámara convencional dotada de un accesorio especial con espejos o bien dos cámaras disparadas sincronizadamente.

A continuación se muestran en las figuras A3.12, A3.13 y A3.14 una serie de equipos especiales para necesidades diferentes.

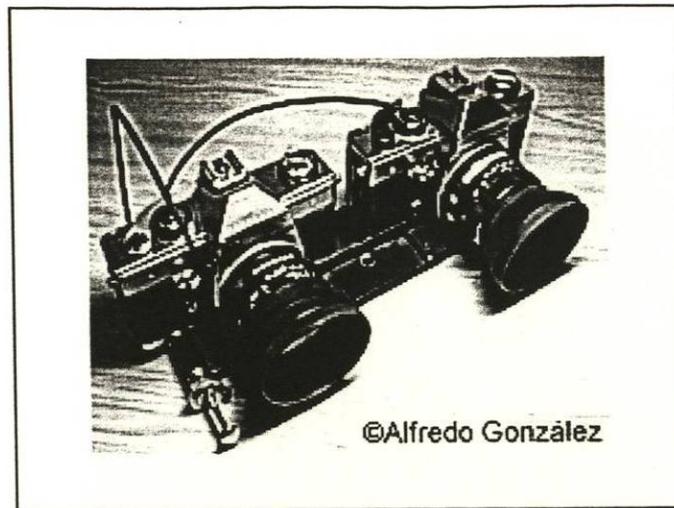


Figura A3.12.- Cámaras gemelas acopladas y sincronizadas de donde se obtienen fotografías hiperestéreo, debido a la gran separación entre objetivos. [29]

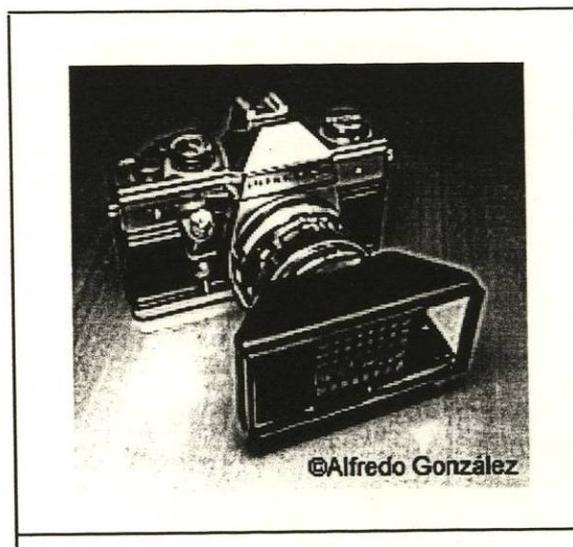


Figura A3.13.- Dispositivo de espejos de Asahi Pentax para fotografía 3D, acoplado a una cámara reflex de 35 mm. [29]

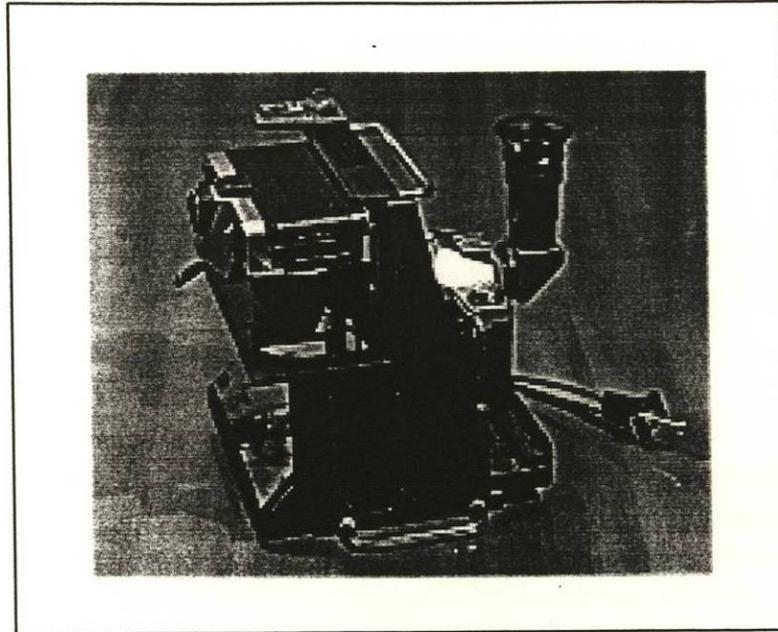


Figura A3.14.- Prototipo patentado del StereoTwin 3D (modelo de utilidad 9.900.6644), diseñado y construido por el autor. Con una separación entre objetivos variable desde 0 a 80 mm., permite obtener fotografías de sujetos en movimiento y a cualquier distancia, estereoscópicamente correctas y de visión confortable. Admite el uso de objetivos de diferentes focales, incluso angulares de 28 mm. único sistema con flexibilidad total para fotografía estereoscópica utilizando formatos estándar. [29]

### **Fotogramas.**

Un fotograma [25] es una vista aérea en la que además de las señales que permiten determinar su centro, se impresionan en los árboles, mediante signos o abreviaturas convencionales, diversos datos que interesan conocer para su utilización posterior, como son: distancia focal, posición del nivel, altura del vuelo, hora en que se ha tomado la vista, etc.

### **Restitución de fotogramas.**

Restituir un punto de un fotograma es determinar su situación relativa respecto a otros que parezcan también en él y tengan una situación conocida lo que se consigue cuando se conoce su altitud y sus coordenadas planimétricas respecto a un sistema de referencia escogido de antemano.

### **Principios de la fotogrametría.**

El objeto de la fotogrametría es pasar de la proyección cónica que constituye el fotograma a la proyección ortogonal que es el plano topográfico.

El conocimiento de las coordenadas de algunos puntos identificados en el fotograma, así como las direcciones del eje de la cámara fotogramétrica, nos resolvería el problema de la restitución.

### **División de la fotogrametría.**

La fotogrametría puede ser tanto terrestre como aérea. En la fotogrametría terrestre, el punto de vista es fijo, y se determina sus coordenadas así como la orientación del eje de la cámara. En la aérea por el contrario, el punto de vista está en movimiento y son desconocidas sus coordenadas así como la dirección del eje de la cámara; por ello es más fácil realizar las restituciones en la terrestre y más sencillas las cámaras utilizadas.

### **Fotogrametría digital.**

Recientemente se ha puesto en marcha el área de fotogrametría digital, encargada del análisis de fotografías aéreas. Su objetivo es levantar información topográfica y gráfica de accidentes geográficos y trabajar en coordinación con el grupo de sistemas de información geográfica del programa manejo de tierras en América Latina.

En la figura A3.15 se muestra uno de los operadores de fotogrametría. Con la fotogrametría aérea se realiza el estudio de la planimetría y altimetría del terreno a partir de fotogramas por medio de la restitución.

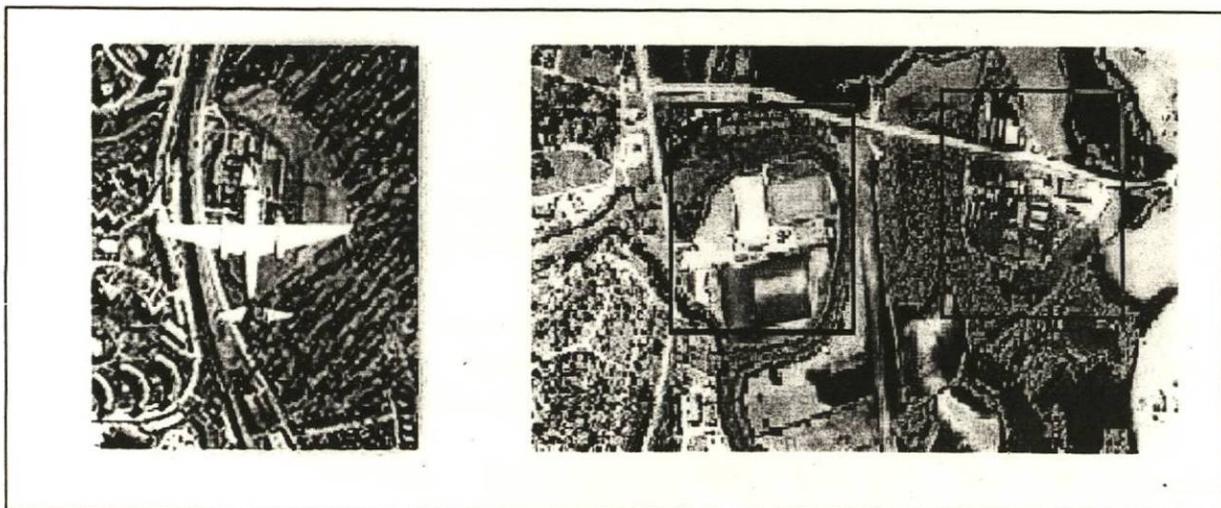


Figura A3.15.- Operadores de fotogrametría: planimetría y altimetría. [25]

## REFERENCIAS

1. Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Donald R. Askeland y Pradeep P. Phulé, 2004; 4ta. Edición, Capítulo 6: Propiedades y Componentes Mecánicos, pp.231-304.
2. Concreto, Estructura, Propiedades y Materiales por P. Kumar Mehta y Paulo J. M. Monteiro, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., 1998. Capítulo 1: Introducción al Concreto, pp. 1-11; Capítulo 2: La Estructura del Concreto, pp. 13-31; Capítulo 12: Progresos en la Mecánica del concreto, pp. 315-366.
3. <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/revista/vedia.pdf>
4. [http://www.tdx.cesca.es/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-1019104-162821/08Mss08de14.pdf](http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1019104-162821/08Mss08de14.pdf)
5. Revista Ingenierías, Enero-Marzo 2003, Vol. VI, No. 18; Estudio Fractográfico de Losetas Cerámicas por Leonardo Chávez Guerrero, Moisés Hinojosa Rivera y Lourdes Peñaloza Peña, pp. 49-54.
6. Tesis: Autoafinidad de Superficies de Fractura en una Aleación Aluminio Silicio por Jorge Adrián Aldaco Castañeda, Febrero 2000.
7. <http://www.materiales-sam.org.ar>
8. Revista Ingenierías, Enero-Marzo 2001, Vol. IV, No. 10; Autoafinidad de Superficies de Fractura en materiales Plásticos por Martín Edgar Reyes Melo y Carlos Guerrero Salazar, pp. 27-37.
9. Revista Ingenierías, Enero-Junio 1998, Vol. I, No. 1; Geometría de Fractales y Autoafinidad en Ciencia de Materiales por Ubaldo Ortiz Méndez y Moisés Hinojosa Rivera, pp. 15-21.
10. Revista Ingenierías, Abril-Junio 2000, Vol. III, No. 7; Rugosidad a Larga Distancia en Superficies de Fractura de Materiales Heterogéneos por Moisés Hinojosa, Elisabeth Bouchaud y Bernard Nghiem, pp. 16-21.
11. Revista Ingenierías, Julio-Septiembre 2000, Vol. III, No. 8; Análisis Fractal de la Microestructura Dendrítica en una Aleación de Aluminio por Moisés Hinojosa, Oswaldo Montelongo y Ubaldo Ortiz, pp.13-19.
12. Revista Ingenierías, Enero-Marzo 2001, Vol. IV, No. 10; Fractales: Fundamentos y Aplicaciones. Parte I: Concepción Geométrica en la Ciencia e Ingeniería por Virgilio A. González G. y Carlos Guerrero, pp. 53-59.
13. Revista Ingenierías, Julio-Septiembre 2005, Vol. VIII, No. 28; Parámetros

- Autoafines de las Superficies de Fractura en un Vidrio Opalino por Leonardo Chávez Guerrero, Virgilio A. González González, Moisés Hinojosa Rivera, pp.7-13.
14. Revista Ingenierías, Octubre-Diciembre 2001, Vol. IV, No. 13; Autoafinidad de Superficies de Fractura del Vidrio por Moisés Hinojosa Rivera, Leonardo Chávez Guerrero, pp. 27-31.
  15. Revista Ingenierías, Abril-Junio 2001, Vol. IV, No. 11; La Rugosidad de las Superficies: Topometría por Moisés Hinojosa Rivera y Martín Edgar Reyes Melo, pp. 27-33.
  16. Revista Ingenierías, Enero-Marzo 2002, Vol. V, No. 14; Autoafinidad de Superficies de Fractura en una Aleación Aluminio-Silicio por Jorge A. Aldaco Castañeda y Moisés Hinojosa Rivera, pp. 57-64.
  17. Revista Ingenierías, Enero-Marzo 2000, Vol. III, No. 6; Análisis de Superficie de Alambión de Cobre con Microscopía de Fuerza Atómica por Xavier Guerrero, Carlos Guerrero, Moisés Hinojosa y René Garza, pp. 3-7.
  18. [http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP.23\\_ES.pdf](http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP.23_ES.pdf)
  19. [http://ingenierias.uanl.mx//22/usode fibras.PDF](http://ingenierias.uanl.mx//22/usode%20fibras.PDF)
  20. <http://www.arqhys.com/resistencia-concreto.html>
  21. <http://civil.uprm.edu/edu/revistadesastres/Vol1Num1/5RamirezColucci.pdf>
  22. [http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp\\_331.htm](http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_331.htm)
  23. [http://www.computamaps.com/sp\\_tech\\_dtm2.php](http://www.computamaps.com/sp_tech_dtm2.php)
  24. <http://www.ugto.mx/figh/memorias/14.htm>
  25. <http://html.rincondelvago.com/fotogrametria.html>
  26. [http://www.spotimage.fr/html/\\_253\\_255\\_256\\_257\\_.php](http://www.spotimage.fr/html/_253_255_256_257_.php)
  27. <http://www.ciat.cgiar.org/dtmradar/estereoscopia-paralaje.htm#2>
  28. <http://www.monografias.com/trabajos15/fotogrametria/fotogrametria.shtml>
  29. <http://www.users.red3i.es/~stereoweb/fotograf.htm>

## LISTADO DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PAG.</b>
2.1	Categorías de la fractura de acuerdo a la extensión de la zona plástica.	7
2.2	Pandeo de un perfil "U".	8
2.3	Rotura por fatiga de un eje iniciada en el alojamiento de la chaveta.	9
2.4	Modos de deformación de grieta.	11
2.5	Modos básicos de carga.	12
2.6	Cuando se somete a tensión un material dúctil en un ensayo, comienzan a formarse un cuello y huecos, iniciando cerca del centro de la barra, por Nucleación en límites de grano o inclusiones. A medida que continúa la deformación, se puede formar un labio de corte y producirse una fractura tipo copa y cono.	13
2.7	Fractura de copa y cono observada cuando se rompe un material dúctil (en este caso un acero 1018 recocido) en una prueba de tensión. El diámetro original de la barra era de 0.505 plg.	14
2.8	Hoyuelos que se forman en una fractura dúctil. En el centro se forman hoyuelos equiaxiales, donde crecen los microhuecos. Los hoyuelos alargados, que apuntan hacia el origen de la falla, se forman en el labio de corte.	14
2.9	(a) Superficie de Fractura de Propileno Isotáctico, en el extremo contrario a donde convergen las marcas de Chevrón se observan una serie morfologías cuya apariencia es en forma de escalones. (b) Superficie de fractura de poliestireno; se distinguen dos zonas, una cercana donde se originó la propagación del frente grieta y que tiene apariencia más lisa que la otra. Las marcas de Chevrón no son tan definidas como en (a), sin embargo a mayores magnificaciones es posible identificarlas.	15
2.10	Superficie de la fractura por fatiga. (a) A bajas magnificaciones, el patrón de marcas de playa indica que la fatiga fue el mecanismo de la fractura. Las flechas indican la dirección de crecimiento del frente de grieta, cuyo origen está en la parte inferior. (b) En altas magnificaciones se observan las estriaciones, muy cercanas entre sí, que se formaron durante la fatiga (1000x).	16
2.11	Deslizamiento de límites de grano durante la termofluencia; causa a) La formación de huecos en una inclusión atrapada en el límite de grano y (b) La creación de un hueco en un punto triple, donde hay tres granos en contacto.	17
2.12	Cavidades de termofluencia que se forman en los límites de grano de un acero inoxidable austenítico (500x).	18
2.13	Fotomicrografía del metal cercano a una fractura de corrosión bajo esfuerzo, mostrando las numerosas grietas intergranulares que se forman a causa del proceso de corrosión (200x).	18
2.14	Micrografías electrónicas de barrido de superficies de fractura en	19

	cerámicos. (a) La superficie de fractura de $Al_2O_3$ , mostrando los planos de clivaje (1250x) y (b) La superficie de fractura del vidrio, mostrando la zona especular (arriba) y las líneas de rasgado características de una fractura conchoidal (300x).	
2.15	Clasificación de la fractura desde el punto de vista ingenieril.	21
2.16	Inicio de la inestabilidad plástica de una probeta durante un ensayo de tracción.	21
2.17	Balance de energías en el proceso de fractura.	23
2.18	(a) Placa con grieta 2a; (b) Diagrama de desplazamiento de carga.	24
2.19	Grieta elíptica pasante en el seno de una lámina delgada semiinfinita sujeta a un esfuerzo tensional remoto.	26
3.1	El conjunto de Cantor, con dimensión fractal = 0.6319.	30
3.2	Construcción de la curva de von Koch. Su dimensión fractal es de 1.2618.	30
3.3	Brócoli de Bruselas. (a) Mostrando la característica autosimilar al repetirse el aspecto de la planta original, (b) Al ser amplificada una sección de la misma.	31
3.4	Movimiento browniano esquematizado como (a) La posición X, Y en función del tiempo y (b) La distancia al origen en función del tiempo.	32
3.5	Principio de operación y componentes de un rugosímetro perfilométrico.	36
3.6	Los cuatro primeros órdenes de defectos topográficos en una superficie con curvatura y ondulación.	37
3.7	Designación de algunos parámetros de rugosidad.	38
3.8	Diagrama esquemático del MFA.	39
3.9	Gráfico de fuerza <i>Vs.</i> distancia entre la muestra y la punta del MFA.	40
4.1	(a) Recipiente con el agua para la mezcla, (b) Recipiente con el cemento Pórtland y (c) Mezcla de agregados finos y gruesos.	43
4.2	Revolvedora de laboratorio utilizada para mezclar los materiales empleados para fabricar el concreto.	44
4.3	(a) Se muestran los moldes rectangulares que se ocuparon para las Probetas, (b) La mezcla vaciada a los moldes.	44
4.4	Se observan las 9 probetas respectivamente en sus moldes.	45
4.5	Probetas ya extraídas de sus moldes.	45
4.6	Prueba de flexión con la mitad de la carga aplicada en cada tercio de luz.	46
4.7	Ensayo de flexión realizado a las barras de concreto.	47
4.8	Geometría de la probeta utilizada para la resistencia a la compresión.	47
4.9	Ensayo de resistencia a la compresión aplicado a las barras de concreto.	48
4.10	Equipo de Microscopía de Fuerza Atómica.	49
5.1	Gráfica correspondiente a la probabilidad de que una muestra de concreto se fracture a diferentes cantidades de esfuerzos por medio de l módulo de Weibull.	52
5.2	Fotografías estereográficas de la probeta no.19.	54

5.3	Fotografía de la superficie de fractura de un par estereográfico.	55
5.4	(a) Imagen obtenida de una superficie de 20 mm de la muestra no. 17 por medio del MEB, a una resolución de $500 \times 20 \mu\text{m}$ a 20 KV. (b) Imagen obtenida de una superficie de 20 mm de la muestra no. 17 por medio del MEB, a una resolución de $1000 \times 10 \mu\text{m}$ a 20 KV.	55
5.5	(a) Imagen obtenida del espectro de rayos "x", muestra no.12 con una resolución de $15 \times 1 \text{ mm}$ a 20 KV. (b) Espectro que muestra las cantidades de elementos obtenidos en la imagen "a".	56
5.6	Imagen obtenida por digitalización tridimensional por láser.	58
5.7	Imágenes obtenidas de los barridos obtenidos por MFA .(a) Muestra capturada a $5 \mu\text{m}$ . (b) Muestra capturada a $10 \mu\text{m}$ . (c) Muestra capturada a $20 \mu\text{m}$ . (d) Muestra capturada a $1200\text{nm}$ .	58
5.8	Perfiles de la probeta no.3 en su parte superior de fractura.	59
5.9	Perfiles de la probeta no.3 en su parte inferior de fractura.	59
5.10	Perfiles de la probeta no.7 en su parte superior de fractura.	60
5.11	Perfiles de la probeta no.7 en su parte inferior de fractura.	60
5.12	(A) Primeros 512 píxeles de la probeta en el cuadro D, (B) Sigüientes 512 píxeles de la probeta señalada anteriormente, (C) Unión de perfiles (comparar con figura en inciso (D), (D) Probeta no.3, perfil dividido con una línea para comparar los perfiles con el inciso C.	61
5.13	(A)Primeros 512 píxeles de la probeta en el cuadro D, (B) Sigüientes 512 píxeles de la probeta señalada anteriormente, (C) Unión de perfiles (comparar con figura en inciso (D), (D) Probeta no.7, perfil dividido con una línea para comparar los perfiles con el inciso C.	61
5.14	Curva de autoafinidad, obtenida a partir de los datos de perfiles capturados mediante el digitalizador plano. Se comprueba que el exponente de Hurst se aproxima a 0.82 concordando con el valor de otros materiales.	62
A1.1	Ésta estructura enterrada de concreto para el almacenamiento de agua, ubicada en las colinas de Oakland – Berkeley, se construyó en 1976-1977 y tiene una capacidad de $132 \times 10 \text{ m}^3$ . Tiene 37m de diámetro, 9m de alto y un muro de 25 a 35 cm. de espesor.	65
A1.2	(a) La estructura circular de concreto precolado más grande hasta hora construida para el transporte de agua ; (b) Éste espectacular proyecto hidroeléctrico consta de una presa de gravedad de concreto hueca de 180m de alto en el río Paraná, en la frontera Brasil- Paraguay, (c) Una de las primeras decisiones para el diseño del acueducto de California fue la de construir un canal de concreto en lugar de un canal de tierra compactada, debido a que los canales forrados con concreto tienen una pérdida de carga relativamente más baja, un bombeo y un costo de mantenimiento más bajo y una menor pérdida por filtración.	66
A1.3	Los elementos de concreto presforzado y fuertemente reforzado de la estructura están expuestos a la acción corrosiva del agua de mar y	67

fueron diseñados para resistir olas de 31m de altura. Por lo tanto, la selección y el proporcionamiento de los materiales para la mezcla del concreto fueron regidos principalmente por la consideración de la velocidad de la construcción empleando cimbras deslizantes y la durabilidad del concreto endurecido ante ese ambiente hostil. Los cilindros apuntalados durante la operación de la cimbra deslizante se muestran en ésta figura.

A1.4	Comportamiento esfuerzo – deformación de un espécimen de acero 2sujeto a cargas incrementadas.	70
A1.5	Sección pulida de una muestra de concreto. La macroestructura total de un material que es visible al ojo humano sin ayuda. En la macroestructura del concreto se distinguen fácilmente dos componentes: agregados de variadas formas y dimensiones y medio aglutinante que consiste en una masa incoherente de la pasta de cemento hidratado.	72
A1.6	Microestructura de una pch. Una amplificación baja (200x) micrografía electrónica de una pch, muestra que la estructura no es homogénea: mientras algunas áreas son densas, las otras son altamente porosas.	73
A1.7	Forma y textura superficial de partículas de agregado: a) Grava, redondeada y suave; b) Piedra triturada, equidimensional; c) Piedra triturada, alargada; d) Piedra triturada plana; e) De peso ligero, angular y rugosa; f) De peso ligero redondeada y lisa.	74
A1.8	Diagrama que representa el sangrado en un concreto recientemente colocado; b) Falla por cortante–adherencia en una muestra de concreto probada en compresión uniaxial.	75
A1.9	Exploración micrográfica electrónica de cristales típicos hexagonales de hidrato de monosulfato y cristales en forma de aguja de etringita, formados al mezclar soluciones de aluminato de calcio y sulfato de calcio.	76
A1.10	Modelo de una pasta de cemento Pórtland bien hidratada. <i>A</i> , representa la agregación de partículas pobremente cristalinas de H-S-C que tiene por lo menos una dimensión coloidal. <i>H</i> , representa los productos cristalinos hexagonales, ellos forman grandes cristales generalmente de 1 $\mu$ m.	77
A1.11	Rango dimensional de sólidos y de poros en una pasta de cemento hidratada.	79
A1.12	Distribución de tamaños de poros en pastas de cemento hidratadas, ésta controla la resistencia, la permeabilidad y los cambios de volumen en una pasta de cemento endurecida. Es afectada por la relación agua/cemento y la edad de la hidratación del cemento.	80
A1.13	Tipos de agua asociada con el hidrato de silicato de calcio.	82
A1.14	Cambios en la porosidad capilar con diversas relaciones y grados de hidratación.	83
A1.15	Influencia de la relación agua/cemento y grado de hidratación, sobre la resistencia y la permeabilidad. Esto determina la porosidad de la pasta de cemento hidratada. El área sombreada muestra el	84

	rango típico de la porosidad capilar en pastas de cemento hidratadas.	
A1.16	a) Pérdida de agua como una función de la humedad relativa; b) Retracción de un mortero de cemento como una función de la pérdida de agua.	85
A1.17	Gráfica de distribución de poros pequeños en pastas de cemento de varias relaciones agua/cemento.	86
A1.18	a) Micrografía electrónica de barrido de cristales de hidróxido de calcio en la zona de transición. b) Representación gráfica de la	87
	zona de transición y de la pasta de cemento masiva en el concreto.	
A1.19	Efecto de la edad en la resistencia a la adherencia (zona de transición) y en la resistencia de la pasta de cemento masiva.	88
A1.20	Diagramas típicos de agrietamiento para concreto normal (resistencia media). a) Después de la retracción por secado; b) Después de la carga a corto plazo; c) Para una carga sostenida durante 60 días al 65 por ciento de la resistencia a la compresión a 28 días. Como resultado de una carga a corto plazo, la retracción por secado y el flujo plástico, la zona de transición en el concreto tiene microgrietas.	89
A2.1	Variación de la densidad de probabilidad $f(t)$ , tasa de fallos $\lambda(t)$ , y la función acumulativa de fallos $F(t)$ en función del tiempo para distintos valores del parámetro de forma $\beta$ .	94
A3.1	Exageración vertical – geometría de imagen donde $B_n$ es la base aérea, $H_n$ es la altura de vuelo; $W_n$ es la amplitud del objeto, $p_n$ es el paralaje del punto "A" debido a la elevación $H_n$ , y $h_n$ es la altura del objeto.	99
A3.2	Exageración vertical – geometría de vista estéreo donde $B_s$ es la base del par estéreo, $H_s$ es la altura de visión en estéreo; $W_s$ es la amplitud aparente del objeto, $\frac{W_i}{2}$ es la mitad de $W_s$ medido en la imagen, $h_s$ es la altura aparente de "A"; $p_s$ es el paralaje aparente el punto "A", y $\frac{P_i}{2}$ es la mitad de $p_s$ medido en la imagen.	99
A3.3	Simulación de un tipo de fotografía aérea.	101
A3.4	Paralaje estereoscópico donde: $A$ representa el punto arbitrario en superficie tierra, a una elevación baja, $B$ es el punto arbitrario en la superficie tierra, a una elevación alta; $a_1$ y $b_1$ son los puntos "A" y "B" como reflejados en la imagen izquierda, $a_2$ y $b_2$ es la punta "A" y "B" como reflejados en la imagen derecha; $X_a$ representa el paralaje en $X$ debido a la elevación del punto "A" sobre	102

	el plano de referencia, $X_b$ representa el paralaje en $X$ debido a la elevación del punto "A" sobre el plano de referencia, $h_a$ es la altura del punto "A" sobre el plano de referencia y $h_b$ es la altura del punto "B" sobre el plano de referencia.	
A3.5	Ángulo paraláctico donde: $A$ es el punto arbitrario a una elevación alta, $B$ es el punto arbitrario a una elevación baja, $\theta_a$ es el ángulo de convergencia más grande para un punto de alta elevación; $\theta_b$ representa el ángulo de convergencia más pequeño para un punto de baja elevación, $D_A$ es la distancia vertical aparente al punto "A", $D_B$ es la distancia vertical aparente al punto "B" y " $D_B - D_A$ " representan la diferencia en distancia vertical aparente de los puntos "A" y "B".	103
A3.6	Paralaje $Y$ debido a la inclinación donde: $a_1, b_1, c_1, d_1$ representan los puntos arbitrarios en una imagen; $a_2, b_2, c_2, d_2$ , representan los puntos correspondientes en la otra imagen con inclinación, $P_{ya}$ es el paralaje en $Y$ del punto "a" debido la inclinación y $P_{yc}$ es el paralaje en $Y$ del punto "c" debido a la inclinación.	104
A3.7	Paralaje $Y$ debido a la variación en alturas de vuelo, donde se expresan $a_1$ y $b_1$ , como los puntos arbitrarios en una imagen, $a_2$ y $b_2$ como los puntos correspondientes en la otra imagen con diferente escala, $P_{ya}$ es el paralaje en $Y$ del punto "a" debido a la diferencia en escala, y $P_{yb}$ es el paralaje en $Y$ del punto "c" debido a la diferencia en escala.	104
A3.8	Paralaje $Y$ debido a la alineación, donde: $a_1$ y $b_1$ son los puntos arbitrarios en una imagen, $a_2$ y $b_2$ son los puntos correspondientes en la otra imagen no alineada, $P_{ya}$ es el paralaje en $Y$ del punto "a" debido a la pérdida de alineación y $P_{yb}$ es el paralaje en $Y$ del punto "c" debido a la pérdida de alineación.	105
A3.9	Forma en que se genera la visión estereoscópica.	106
A3.10	Aplicación del usuario en mapeo de vías y geomorfología de gran zona.	107
A3.11	Tipo de cámara utilizada para tercera dimensión (3D).	108
A3.12	Cámaras gemelas acopladas y sincronizadas de donde se obtienen fotografías hiperestéreo, debido a la gran separación entre objetivos.	110
A3.13	Dispositivo de espejos de Asahi Pentax para fotografía 3D,	110

- acoplado a una cámara reflex de 35 mm.
- A3.14 Prototipo patentado del StereoTwin 3D (modelo de utilidad 9.900.6644), diseñado y construido por el autor. Con una separación entre objetivos variable desde 0 a 80 mm., permite obtener fotografías de sujetos en movimiento y a cualquier distancia, estereoscópicamente correctas y de visión confortable. Admite el uso de objetivos de diferentes focales, incluso angulares de 28 mm. único sistema con flexibilidad total para fotografía estereoscópica utilizando formatos estándar. 111
- A3.15 Operadores de fotogrametría: planimetría y altimetría. 112

## LISTADO DE TABLAS

<b>TABLA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PAG.</b>
4.1	Tamaño y proporción de los agregados gruesos.	41
4.2	Tipo y proporción de los agregados finos.	42
4.3	Tipo y proporción de la corrección en los agregados finos.	42
5.1	Resultados de las cargas máximas aplicadas, así como también la obtención del módulo de ruptura de las 24 muestras en el ensayo de flexión.	51
5.2	Resultados de las estadísticas en la prueba a flexión por los métodos de la media, varianza, y desviación típica.	52
5.3	Resultados de las cargas y esfuerzos obtenidos de la resistencia a la compresión.	53
5.4	Resultados de las estadísticas en las prueba de resistencia a la compresión por los métodos de la media varianza, y desviación típica.	53
5.5	Porcentaje de los elementos químicos presentes en la muestra no. 12.	57

## **AUTOBIOGRAFÍA**

Denisse Alexandra Martínez Hernández nace el día 30 de Junio del año de 1981 en la Ciudad de Nueva Rosita, Coahuila. Es hija del señor Andrés Martínez Ruíz y la señora Alejandra Hernández Canizalez.

Cursa sus estudios de Licenciatura en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por la Universidad Autónoma de Nuevo León, culminando con ellos en diciembre del 2004.

Con fines de obtener su titulación y continuar con los estudios de Maestría, se presenta éste trabajo.

