

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



TESIS

**“EXONENTES DE ESCALAMIENTO EN SUPERFICIES DE
FRACTURA DE COMPOSITOS GRANULADOS”**

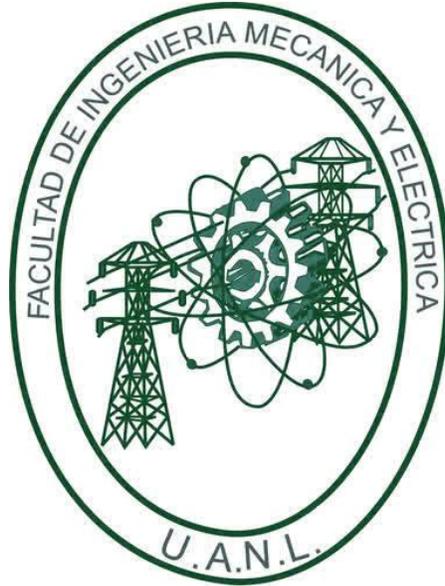
PRESENTA

IC. OMAR RODRÍGUEZ VILLARREAL

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

JULIO, 2017

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS
“EXONENTES DE ESCALAMIENTO EN SUPERFICIES DE
FRACTURA DE COMPOSITOS GRANULADOS”**

PRESENTA

IC. OMAR RODRÍGUEZ VILLARREAL

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

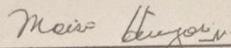
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

JULIO 2017

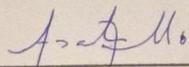
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "EXONENTES DE ESCALAMIENTO EN SUPERFICIES DE FRACTURA DE COMPOSITOS GRANULADOS" realizada por el alumno Ing. Omar Rodríguez Villarreal, con número de matrícula 1352720, sea aceptada para su defensa como opción al grado de "Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales"

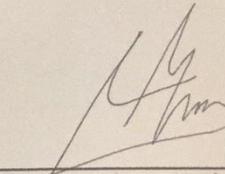
El Comité de Tesis



Dr. Moisés Hinojosa Rivera
Director

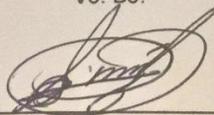


Dra. Ana María Arato Tovar
Co-asesor



Dr. Daniel Salas Limón
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 3 de julio de 2017

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Este documento ha sido elaborado tomando como base los estándares y mejores prácticas internacionales, es furto de mi propio trabajo y contiene información original, asimismo en él se discute información previamente publicada por deversas autores. La información dicumental incluida en este trabajo forma parte del estado de arte y se cita debidamente, dando credito y reconocimiento a los autores originales.

Omar Rodriguez Villarreal

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza N.L. Julio del 2017

PROLOGO

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por la oportunidad de cursar un posgrado y culminarlo con la presente investigación.

A la **Universidad Autónoma de Nuevo León** y a la **Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME)** por abrirme sus puertas y brindarme un constante apoyo para mi desarrollo profesional. Al **CONACYT**, por brindarme las facilidades y el soporte económico para la obtención de este grado.

A mis asesores, el **Dr. Moisés Hinojosa Rivera** y la **Dra. Ana María Arato Tovar**, por su directriz y confianza que me otorgaron durante la realización de esta investigación.

A la empresa **TECMED-3D** por su valiosa colaboración técnica-científica que fue indispensable para la culminación de este proyecto.

A la **Dra. Satu Elisa Schaeffer** por su gran aportación de conocimientos en esta investigación que fueron de gran importancia para la realización de este proyecto.

Al **Dr. Lionel Choplin** y **Dra. Veronique Sadtler** por las facilidades y apoyo económico durante mi estancia en la Universidad de Lorena en la ciudad de Nancy, Francia.

Al **Dr. Daniel Salas Limón** por impulsar el desarrollo de mi formación profesional, a través de excelentes consejos y motivación que me han llevado a alcanzar grandes logros.

Gracias...

*“Si tienes una pasión, si realmente crees en algo, esfuérzate
y podrás hacer posibles las cosas con las que has soñado”*

Norman Foster

*"Se tarda menos en hacer una cosa bien
que en explicar por qué se hizo mal."*

Henry Wadsworth Longfellow



Índice

Contenido	Página
Resumen.....	12
Capítulo I. Introducción	
1.1 Generalidades.....	15
Capítulo II. Marco teórico	
2.1 Mecánica de la fractura.....	19
2.1.1 Defectos de un material y su concentración de esfuerzos.....	23
2.1.2 Mecánica de la fractura en concreto.....	27
2.1.3 Zona de proceso de fractura.....	30
2.2 Fractografía.....	35
2.2.1 Fractura dúctil y frágil.....	35
2.2.2 Fractura en compositos particulados	38
2.2.3 Fractografía en materiales frágiles.....	40
2.2.4 Rotura de materiales cerámicos.....	40
2.2.5 Geometría de fractales y autoafinidad.....	41
2.2.6 Cálculo de la dimensión fractal.....	42
2.2.7 Autosimilitud y autofinidad.....	45
2.2.8 Superficies de fractura: objetos autofines.....	46
2.2.9 Leyes de escalamiento.....	48
2.2.10 Escalamiento anómalo.....	50

Capítulo III. Estado del arte

3.1 Antecedentes.....	53
-----------------------	----

Capítulo IV. Motivación, hipótesis y objetivos

4.1 Motivación, hipótesis y objetivos.....	64
--	----

Capítulo V. Metodología experimental

5.1 Diseño de mezclas de concreto.....	69
--	----

5.1.1 Proporcionamiento.....	69
------------------------------	----

5.2 Adquisición y preparación de materiales.....	70
--	----

5.3 Caracterización de la materia prima.....	70
--	----

5.4 Pruebas físicas.....	71
--------------------------	----

5.4.1 Densidad del cemento.....	71
---------------------------------	----

5.4.2 Densidad de agregados gruesos y finos.....	71
--	----

5.4.3 Tamaño de partícula del cemento Portland ordinario (CPO).....	71
---	----

5.5 Preparación de mezclas.....	72
---------------------------------	----

5.6 Identificación de mezclas.....	73
------------------------------------	----

5.7 Pruebas en estado fresco.....	74
-----------------------------------	----

5.8 Pruebas fisicoquímicas y mecánicas.....	79
---	----

5.8.1 Ensayo a flexión.....	79
-----------------------------	----

5.8.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	81
---	----

5.9 Topometría.....	81
---------------------	----

5.9.1 Análisis de escalamiento.....	82
-------------------------------------	----

Capítulo VI. Resultados y discusión

6.1 Distribución de tamaño de partícula.....	84
6.2 Concreto en estado fresco.....	84
6.2.1 Temperatura.....	84
6.2.2 Revenimiento y peso volumétrico.....	85
6.3 Ensayos mecánicos.....	85
6.4 Caracterización microestructural.....	87
6.5 Estudio de superficies de fractura	89

Capítulo VI. Conclusiones

Referencias.....	98
Anexos.....	

Índice de figuras

Número		Página
1	Modelo de fisura cohesiva.....	16
2	Modos básicos de carga	21
3	Representación esquemática de una grieta interna en una placa de anchura infinita.....	24
4	Esquema de análisis de esfuerzos.....	28
5	Modelo de formación de una grieta en un material.....	31
6	Relación esfuerzo-deformación (método de Bazant).....	32
7	Modelo de grieta ficticia	34
8	Etapas de una fractura dúctil.....	36
9	Superficies obtenidas por diferentes tipos de fractura.....	37
10	Representación de tipos de fracturas.....	37
11	Electrones retrodispersados en una superficie de concreto....	38
12	Patrón de fractura.....	39
13	Esquema del desarrollo del patrón “mirror”.....	40
14	Construcción de la curva de von Koch.....	43
15	División de un segmento de recta de longitud en $N(L)$ partes..	43
16	Cuadrado en $N(L)$ elementales de lado L	44
17	Visión de un cubo de volumen 1 en $N(L)$ cubos elementales de arista igual a L	44
18	Curva de Koch y modelo de la propagación de una grieta dentro de la zona de proceso.....	46
19	Resultado de Mandelbrot que estableció una relación entre la energía de impacto y la dimensión fractal de las superficies de fractura en aceros tipo Maraging.....	47
20	Esquema representativo del método de la ventana de ancho variable	49
21	Representación gráfica del escalamiento de la rugosidad.....	50
22	Escalamiento anómalo.....	51
23	Metodología descrita en el diagrama de operación.....	68
24	Resumen de elaboración de mezclas.....	75
25	Medición de temperatura.....	76
26	Medición del revenimiento de concreto.....	77
27	Medición de masa unitaria.....	78
28	Ensayo a flexión.....	79
29	Máquina Instron LX series.....	80
30	Cortadora con disco de diamante.....	81
31	Diagrama que indica la dirección en que fueron realizado los barridos para las vigas de concreto y mortero.....	82
32	Distribución de tamaño de partícula del cemento.....	84
33	Resultado de los ensayos a flexión para las probetas de concreto y mortero.....	86

34	Cortes de probetas de concreto y mortero.....	87
35	Muestra de concreto observadas en MEB.....	88
36	Muestras de mortero observadas en MEB.....	89
37	Mapa de elevación de probetas uno y dos.....	90
38	Mapa de elevación de probetas tres y cuatro.....	90
39	Mapa de elevación de probetas cinco y seis.....	91
40	Mapa de elevación de probetas siete y ocho.....	91
41	Ilustración en 3D de pieza 1-1.....	93
42	Relación de la propagación de fisuras en probeta tres.....	93
43	Fractura en probeta de vidrio vs probeta de concreto.....	94

Índice de tablas

Número		Página
I	Proporcionamiento para mezcla de 40 litros de mortero.....	69
II	Proporcionamiento para mezcla de 50 litros de concreto.....	70
III	Características de mezclas elaboradas.....	72
IV	Resultados de medición de temperatura.....	85
V	Resultados de medición del revenimiento.....	85
VI	Resultados de peso volumétrico.....	85
VII	Resultados de las probetas ensayadas a flexión.....	86
VIII	Relación de resultados del exponente de Hurst.....	92

Resumen

Dentro del estudio de esta tesis, se lleva a cabo el análisis del comportamiento auto-fín de superficies de fractura de probetas de concreto y mortero. Cuatro probetas de concreto y cuatro de mortero fueron fabricadas en moldes de madera de distintas dimensiones. Para las barras de concreto se fabricaron en cuatro tamaños diferentes de 10x10x30 cm, 15x15x50 cm, 15x15x60 cm y 15x10x50 cm, en el caso de las probetas de mortero fueron elaboradas a 10x10x30 cm, 15x10x60 cm, 15x10x50 cm y 10x10x40 cm. Las superficies de fractura se generaron mediante ensayos a flexión a cuatro puntos. Los datos topométricos y el análisis de auto-afinidad fueron generadas por medio de tecnología en medición tridimensional con una nube de puntos por un laser line probe.

CAPÍTULO

I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

1. Introducción

1.1. Generalidades.

Cuando un material sólido se somete a esfuerzos mecánicos, puede llegar a fracturarse, a este fenómeno se le conoce como fractura del material, que hoy en día no es comprendido en su totalidad. Para estudiar el fenómeno de la ruptura se analizan las superficies que resultaron del proceso de separación del material fracturado, pues ofrecen información relevante, como por ejemplo; mecanismos de falla, velocidad de propagación de grietas, tipo de condiciones de los esfuerzos a que el material estuvo sometido. ^[1]

Los materiales utilizados en la construcción como el concreto, se pueden clasificar de acuerdo a sus curvas esfuerzo-deformación como un material frágil, causi-frágil o dúctil. Un material causi-frágil presenta una curva esfuerzo-deformación a tensión en la cual se presenta un intervalo de ablandamiento por deformación después de llegar al esfuerzo máximo ^[2]. Un parámetro de gran interés en materiales causi-frágiles como el concreto, es la energía de fractura, que es un factor en la simulación numérica que depende de las propiedades mecánicas de los materiales que lo conforman y de su calidad ^[3], la energía de fractura (G_F) es la cantidad de energía necesaria para crear una unidad de superficie de fractura y corresponde al área bajo la curva de la función de ablandamiento; sin embargo, un método utilizado para determinar la G_F es mediante el modelo de fisura cohesiva (MFC) ^[4]. (Ver figura 1)

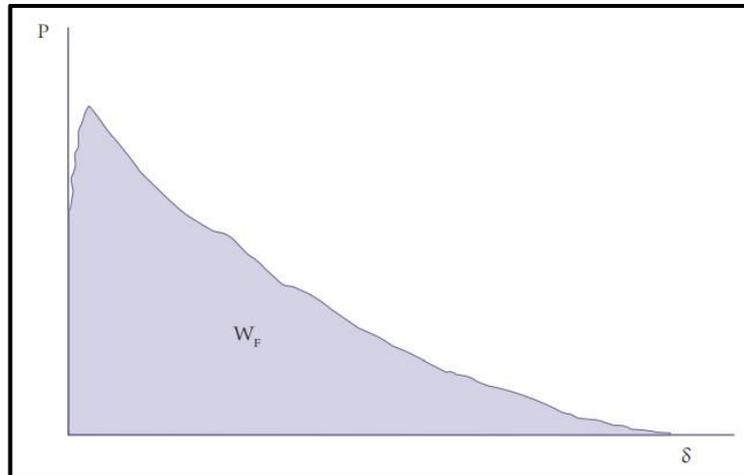


Figura 1. Modelo de fisura cohesiva. Energía de fractura en la curva contra desplazamiento ^[4].

Después de cierto tiempo, todas las estructuras de concreto son propensas a la fisuración y su comportamiento a la fractura se ve influido por el crecimiento, propagación y extensión de la fisura a través de la denominada zona de proceso de fractura (FPZ, por sus siglas en inglés), el crecimiento de la fisura en la FPZ es influenciado por la resistencia que pueda llegar a tener el concreto, la forma y tamaño de sus agregados, la adición y calor de hidratación. ^[5]

La mecánica de fractura surgió con las investigaciones de Griffith (1921-1924) donde detallaba los criterios de la formación y propagación de grietas en sólidos, los cuales se basaron en conceptos de transformación de energía elástica y energía de superficie.

Este trabajo de investigación tiene como principal motivación de ampliar el conocimiento sobre la fractura de los materiales compuestos con el propósito de comprender este fenómeno. Se eligieron como material de estudio el concreto y el mortero que fueron fabricados a partir de cemento Portland ordinario (CPO 40) con agregados gruesos y finos.

El estudio de la fractura del concreto y mortero es relevante pues son ampliamente utilizados en la industria de la construcción y muchas veces las vidas o la integridad de las personas depende de la seguridad de las estructuras hechas con estos materiales.

CAPÍTULO

II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2

2. Marco teórico

2.1 Mecánica de la fractura

La fractura es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a un esfuerzo. Las cargas que se aplican pueden ser de tensión, compresión o torsión. En general, los materiales son posibles dos tipos de fractura; dúctil y frágil. La clasificación de cada tipo de fractura se basa en la capacidad que posee el material para experimentar una deformación plástica.

En la mecánica de la fractura el objetivo es describir el mecanismo de la propagación de fisuras o grietas en una superficie, así como la distribución de tensiones y deformaciones que ocurren en un material agrietado que es sometido a cierta tensión externa. Con los trabajos de Griffith ^[6] sobre los criterios de propagación de grietas en sólidos, es cómo surgió esta ciencia que se basa en conceptos de transformación de energía elástica en energía de superficie. Por otra parte, Irwin^[7] plantea que el proceso de fractura no se concentra en un punto determinado, como ocurre en un análisis elástico, sino en una zona pequeña pero finita, que lleva por nombre zona plástica, donde los esfuerzos dejan de ser infinitas porque parte de la energía elástica se consume en la deformación plástica del material. En resumen, la mecánica de fractura es la disciplina que estudia el comportamiento de los materiales que contienen grietas u otros defectos. El término defecto se refiere a características tales como pequeños poros, inclusiones, o microfisuras. ^[1]

Los materiales dúctiles presentan una deformación plástica con alta absorción de energía antes de la fractura. La ductilidad puede ser cuantificada en términos de porcentajes de alargamiento y el porcentaje de reducción en el área. Además, la ductilidad es una función de la temperatura del material. Durante el proceso de fractura interviene la formación y propagación de grietas.

La capacidad de un material para resistir el crecimiento de una grieta depende de diversos factores:

1. Los defectos más grandes dentro de un material reducen los esfuerzos permitidos y para reducir el tamaño del defecto y mejorar la resistencia a la fractura se utilizan técnicas de fabricación, tales como filtración de impurezas y prensado isostático en caliente.
2. Los materiales frágiles como la cerámica y polímeros tienen más bajo índice de tenacidad de fractura que los metales.
3. El aumento de la temperatura normalmente aumenta la resistencia a la fractura y la prueba de impacto.
4. Un tamaño pequeño de grano, mejora la resistencia a la fractura, mientras que más puntos o defectos y dislocaciones reducen la resistencia a la fractura.

El enfoque de la mecánica de la fractura nos permite diseñar y seleccionar materiales, teniendo en cuenta la existencia de defectos que contengan. Al aplicar una carga suficientemente elevada a un material, esta hace que se rompan los enlaces que mantenían unidos a los átomos que lo conformaban.

En materiales compuestos existen tres formas de fallos fundamentales en las fracturas:

Modo I: modo de apertura

Modo II: modo de cizallamiento en el plano

Modo III: modo de cizallamiento

Un ejemplo de materiales compuestos es el concreto, que está constituido por partículas dispersas como cemento, grava y arena. Cuando, la complianza vs la longitud de la grieta ha sido obtenida para una configuración de espécimen dada, la velocidad de liberación de energía G_c puede ser determinada registrando la carga a la fractura. Ahora vamos a analizar que pasa al campo de esfuerzos cerca de la punta de la grieta para una de las configuraciones mostradas en la figura 2.

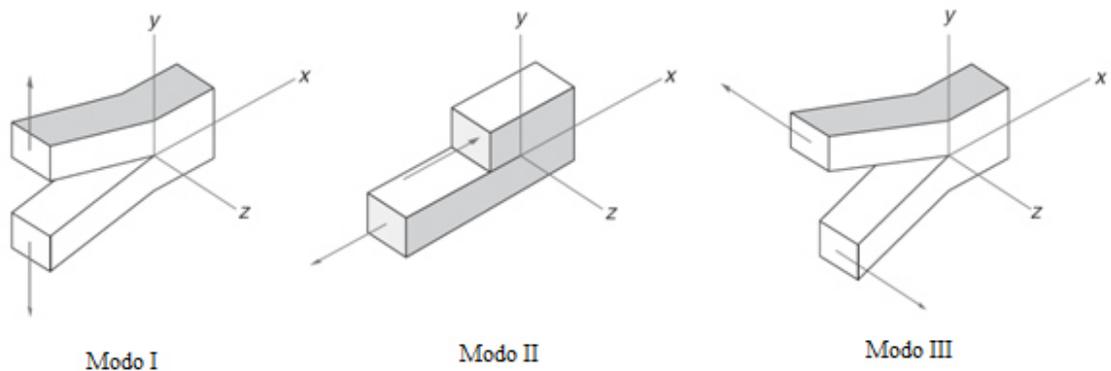


Figura 2. Modos básicos de carga de carga; Modo I: modo de apertura, Modo II: modo de corte y Modo III: modo de cizalla ^[8] .

Los tres tipos relativos de movimiento de las dos superficies de fractura son clasificados como (a) Modo I: modo de tensión o apertura, (b) Modo II: modo de corte en un plano de deslizamiento, y (c) Modo III: modo de cizalla o desgarre.

Muchas de las situaciones prácticas de diseño y falla están asociadas con el Modo I. Los esfuerzos en la punta de la grieta para este modo están dados por:

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 + \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2} \operatorname{sen} \frac{3\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 - \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2} \operatorname{sen} \frac{3\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

$$\tau_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\operatorname{sen} \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2} \right) \quad (3)$$

K_I es llamado el factor de intensidad de esfuerzos para el Modo I. Un análisis dimensional de las ecuaciones 1, 2 y 3 indica que el factor de intensidad de esfuerzos debe de estar linealmente relacionado con el esfuerzo y con la raíz cuadrada de una longitud característica. Asumiendo que esta longitud característica está asociada con la longitud de la grieta, tenemos:

$$K_I = \sigma \sqrt{a} f(g)$$

donde $f(g)$ es una función que depende de la geometría del espécimen y de la grieta.

El factor de intensidad de esfuerzos puede ser calculado para una variedad de configuraciones de forma de grieta. Suponga que medimos el valor del esfuerzo a la fractura en un experimento dado. Usando la ecuación 3 determinamos el valor crítico del factor de intensidad de esfuerzos K_c o, como es usualmente llamado en la literatura, la tenacidad a la fractura. Si se asume que K_c es una propiedad del material, tenemos otra poderosa herramienta para predecir las combinaciones críticas de esfuerzo y longitud de grieta para otras configuraciones de Modo I.

Irwin mostró que la velocidad de liberación de energía y el factor de intensidad de esfuerzos son enfoques equivalentes. Para un comportamiento lineal elástico, considerando solamente Modo I y condiciones de esfuerzo plano:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} \quad (4)$$

2.1.1 Defectos de un material y su respectiva concentración de esfuerzos

La presencia de defectos en un material genera una discrepancia entre los valores experimentales de la resistencia de algún material frágil y las estimaciones teóricas. ^[1]

Cuando un esfuerzo a un nivel atómico exceda la resistencia cohesiva del material una fractura puede presentarse en cualquier material. Entonces, los defectos tienden a disminuir su resistencia global debido a la magnificación de esfuerzos localmente. Inglis propuso la primera evidencia cuantitativa de la concentración de esfuerzos que tenían su origen en los defectos ^[8], analizando ranuras elípticas dentro de placas rectangulares, (Ver figura 3) Sus análisis incluyeron una ranura elíptica de $2a$ de largo por $2b$ de ancho con cargas aplicadas perpendicularmente al eje mayor de la elipse. Concluyó que la ranura no

fue influenciada por las fronteras de la placa (largo del espécimen $\gg 2a$ y el ancho del espécimen $\gg 2b$). El esfuerzo en la punta de eje mayor (punto A) está dado por:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (5)$$

La relación σ_A/σ se define como el factor de concentración de esfuerzos k_t . Cuando $a = b$ el agujero es circular y $k_t = 3.0$.

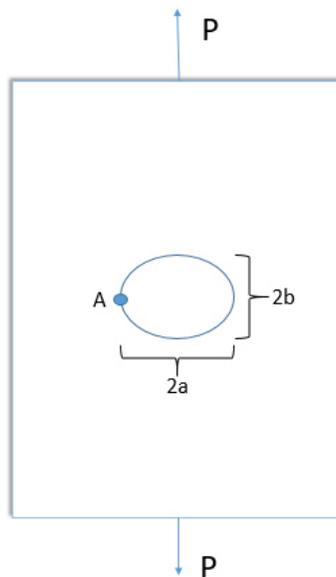


Figura 3. Representación esquemática de una grieta interna en una placa de anchura infinita.^[8]

Conforme el eje mayor a aumenta en relación a b , el agujero elíptico comienza a convertirse en una grieta afilada. Para este caso, Inglis encontró más conveniente expresar la ecuación 5 en términos del radio de curvatura ρ :

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (6)$$

Donde:

$$\rho = \frac{b^2}{a} \quad (7)$$

Cuando $a \gg b$, la ecuación 6 se transforma a:

$$\sigma_A = 2\sigma \sqrt{\frac{2a}{\rho}} \quad (8)$$

Inglis mostró ^[8] que la ecuación 8 otorga buena aproximación para la concentración de esfuerzos debido a la muesca.

La ecuación 4 se utiliza para pronosticar el esfuerzo infinito que surge en la punta de la grieta, donde $\rho = 0$. En la primera ocasión que fue expuesto este resultado, surgió una controversia, ya que ningún material es capaz de soportar un esfuerzo infinito. Según estudios previos, cuando un material contiene una grieta en forma afilada, éste debería fallar cuando se aplica una carga infinitesimal. La teoría de la grieta afilada motivó a Griffith ^[6] a desarrollar una teoría de fractura desde el punto de vista energético en la zona donde surgen las concentraciones de esfuerzos.

Los tipos de defectos en cualquier material pueden ser: puntuales, lineales y superficiales.

Pero según su composición se clasifican en ^[9]:

- Estequiométricos o intrínsecos: los defectos no modifican la composición
- No-estequiométricos o extrínsecos: es cuando ocurren cambios en la composición y aparecen defectos

Según la dimensión de los defectos se pueden clasificar:

Puntuales: Se producen en procesos de solidificación (impurezas, aleaciones), por bombardeos de partículas, procesos de deformación plástica. Pueden ser del tipo vacante e intersticiales.

Lineales-Dislocaciones: se pueden desplazar en el interior del cristal con esfuerzos mecánicos relativamente bajos y producir el desplazamiento completo de planos cristalinos. Su formación es durante la solidificación y enfriamiento, por deformación plástica del sólido, condensación de vacantes o por desajustes atómicos en las soluciones sólidas.

Los tipos son: a) dislocación de arista, cuña, hélice, tornillo, burguer o dislocaciones mixtas.

Planares o defectos de superficie: Separan granos/cristales de diferente orientación en un material policristalino. Interfase entre dos cristales/granos con orientación atómica. Provocan irregularidades de la red, y proporcionan puntos adicionales para fijar y detener el movimiento de dislocaciones. Aumentan la resistencia del material (particularmente las fronteras de grano) dando una disminución en la ductibilidad. Su formación ocurre durante el proceso de solidificación de cristales formados a partir de núcleos/semillas que crecen simultáneamente.

Los tipos son: Bordes, frontera, límite de grano, superficie del material, falta de apilamiento y plano de macla. En nivel microscópico de esfuerzos se entiende generalmente el esfuerzo promedio calculado relacionado al volumen de material caracterizado por una estructura muy fina.

2.1.2 Mecánica de la fractura en el concreto

Se tuvieron que la tenacidad a la fractura aumenta con: (a) el volumen de agregados, (b) el tamaño máximo de agregado y (c) la rugosidad del agregado. En cambio, la tenacidad disminuye con un incremento de la relación de agua/cemento e incrementando el contenido de aire. Pues el valor de la tenacidad a la fractura K_c , es afectado en gran proporción. Para el análisis de los esfuerzos últimos cuando se realiza un cambio en las dimensiones de una placa agrietada (Ver figura 4) se propone utilizar el caso propuesto por Cedolin ^[10]. Donde la concentración de esfuerzos está dada por $K = p\sqrt{\pi a}f(a/b)$ donde $f(a/b)$ es un factor de corrección para la geometría.

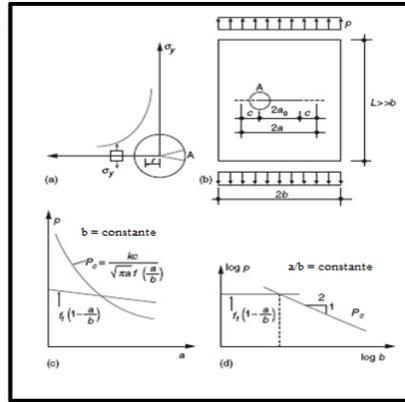


Figura 4 (a) Variación de σ_y en la punta de la grieta para un cuerpo elástico; (b) placa agrietada bajo esfuerzos de tensión; (c) comparación entre los valores últimos de tensión, calculados de acuerdo a la mecánica de la fractura y el criterio de resistencia a la tensión; (d) Efecto del espesor de la placa para especímenes geoméricamente similares [9] .

El esfuerzo crítico p_c , asociado con la tenacidad a la fractura K_c , está dado por:

$$p_c = \frac{K_c}{\sqrt{\pi a} f(a/b)} \quad (9)$$

La correlación se muestra en la figura 4-c. El criterio de la resistencia será evaluado. Pues el esfuerzo de tensión promedio f_t en el espécimen que se evalúa varia porque las dimensiones de la grieta afecta la sección neta del espécimen. Esta relación está dada por:

$$p_t 2b = f_t (2b - 2a) \quad (10)$$

ó

$$p_t = f_t \left(1 - \frac{a}{b} \right) \quad (11)$$

También se puede observar en la figura 4-c. Como se demuestra en la Figura 4-c, para grietas de tamaños pequeños, el criterio de resistencia es el que predomina, y no es posible concluir sobre las propiedades de la mecánica de la fractura.

Para el estudio de placas geoméricamente similares (a/b constante) y con variación en b .

La ecuación 9 puede ser rescrita como:

$$p_c = \frac{K_c}{\sqrt{b} f^*(a/b)} \quad (12)$$

Donde $f^*(a/b) = \sqrt{\pi a/b} f(a/b)$. Ya que (a/b) es constante, cuando la ecuación 8 se grafica como una función de b en una escala logarítmica, se obtiene como resultado una línea recta con pendiente $-1/2$ (figura 4d). La ecuación 11 también se muestra en la Figura 3-d, y debido a que a/b es constante esto resulta en una línea recta como pendiente cero. De nueva cuenta, se puede concluir que para especímenes pequeños los criterios de resistencia dominan y las propiedades de la mecánica de la fractura no pueden ser inferidas. La relación que existe entre el criterio de la mecánica de la fractura (ecuación 11) y el criterio de la resistencia (ecuación 12) está dado por:

$$\frac{p_c}{p_t} = \frac{K_c}{f_t \sqrt{b} (1-a/b) f^*(a/b)} \quad (13)$$

El número de fragilidad se puede definir como, $s = K_c / f_t \sqrt{b}$ para describir la naturaleza del colapso; entre menor sea el número de fragilidad el comportamiento del espécimen es más frágil. La fractura se presenta en especímenes con números de fragilidad pequeños, esto es, en materiales con tenacidades a la fractura relativamente bajas, a mayor resistencia

a la tensión y en especímenes de mayor tamaño. La naturaleza del colapso se caracteriza a través del número de fragilidad que sirve para problemas en una dimensión, en cambio para barras de flexión es necesaria información adicional. Es importante conocer que las dimensiones físicas de la resistencia a la tensión $[FL^{-2}]$ y la tenacidad a la fractura $[FL^{-3/2}]$ son diferentes, como sea el número de fragilidad es adimensional.

El número de fragilidad se puede expresar como función del módulo elástico E y la velocidad de energía G , en lugar de la tenacidad a la fractura $s = \sqrt{EG}/(f_t \sqrt{b})$. Este resultado facilita a entender los resultados experimentales de concretos hechos con ceniza de sílice usualmente tienen más microgrietas que el concreto normal.

2.1.3 Zona de proceso de fractura

El área donde aparecen las microgrietas en el concreto que se desarrolla al frente de la punta de la grieta, es conocida como zona de proceso de fractura. La descripción de esta área es relevante en el inicio del desarrollo de la fractura no lineal para el concreto. Aunque la caracterización experimental requiere un alto conocimiento, actualmente nuevos métodos han sido propuestos en varias investigaciones de este tipo. ^[11]

El determinar la ubicación de la punta de la grieta es de suma importancia, el perfil de apertura de la grieta y el estado promedio de microgrietas enfrente de la punta de la grieta principal. Una opción, puede ser la microscopía óptica, pero hay que tomar en cuenta que su resolución es limitada (10 μm). En modelos tradicionales de microscopio electrónico de barrido tiene una mejor resolución, pero el vacío que requieren para su funcionamiento induce cambios importantes en los patrones de agrietamiento debido al encogimiento por

secado. Dado que el concreto es muy heterogéneo y su estado tridimensional de sus esfuerzos que tienden aparecer a lo largo del frente de grieta también lo es, el perfil de ésta no es lineal.

Desafortunadamente la distribución real de deformaciones dentro de esta zona es comúnmente muy difícil de incorporar en modelos analíticos y hasta la fecha, solamente modelos simplificados han sido propuestos. Bazant y colaboradores ^[12] desarrollaron el modelo de banda de grietas, donde el total de la zona de fractura es representado por una banda de material microagrietado con espesor w_c (Figura 5). El modelo asume una relación esfuerzo-deformación lineal E_c por arriba de la resistencia a la tensión f_t y una relación deformación-ablandamiento con pendiente E_t . El área encerrada por el diagrama de la Figura 5 representa la energía de fractura, dada por:

$$G_f = w_c \int_0^{\varepsilon_e} \sigma d\varepsilon_f = \frac{1}{2} w_c f_t^2 \left(\frac{1}{E_c} - \frac{1}{E_t} \right) \quad (14)$$

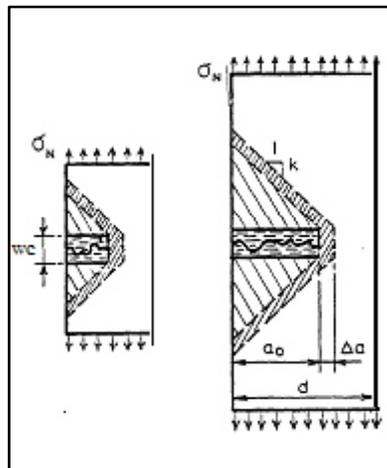


Figura 5. Modelo que considera la formación de una zona de daño alrededor de la grieta principal que provoca la falla del material. La zona de daño es mayor entre mayor sea el tamaño del espécimen (región achurada en la figura) ^[13].

Puede imaginarse que la formación de la banda de grietas de espesor w_c reduce la densidad de la energía de deformación igual a cero (sección sombreada en la figura 5). Cuando la banda de grietas se extiende en una cantidad a , la energía de deformación adicional liberada proviene de la zona sombreada en la figura 5, si los modos de fractura de dos especímenes son geoméricamente similares, como es usualmente el caso, entonces, entre más grande sea el espécimen, mayor será la banda de grietas a la falla. Consecuentemente, el área de la zona sombreada también es mayor siendo dada por $h\Delta a + 2ka\Delta a$ donde k es una constante empírica que depende de la forma de la estructura. Esto ilustra que, en estructuras grandes, más energía es liberada por la misma extensión de una banda de grieta. En este modelo, Bazant considera a w_c como constante, independiente del tamaño del material, punto que se cuestionará más adelante en este estudio (ver figura 6).

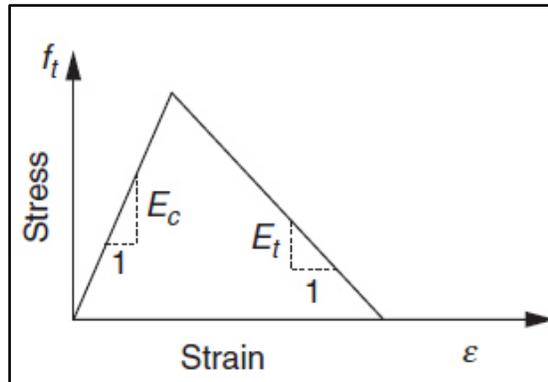


Figura 6. Relación esfuerzo-deformación para el método de la banda de grietas propuesto por Bazant y colaboradores ^[14]

Este procedimiento ha probado ser muy exitoso cuando es usado con métodos de elemento finito. Otras simplificaciones son obtenidas cuando la zona de proceso de fractura es modelada como una grieta “tied crack” (figura 7), esto es, una grieta con espesor w y una

relación específica esfuerzo-deformación ($\sigma-w$). Debido a que el principal objetivo de este modelo es reemplazar la zona de proceso de fractura real por una equivalente grieta ficticia, este método ha sido llamado *modelo de grieta ficticia*. Este modelo se detalla a continuación.

Modelo de grieta ficticia. El modelo de grieta ficticia fue creado y expandido por Hillerborg, Petersson y colaboradores ^[15]. Uno de los objetivos del modelo es capturar la naturaleza compleja del concreto en tensión. La cantidad de microgrietas en el concreto, el cual está en tensión, es pequeño antes de que el esfuerzo pico sea alcanzado, por lo tanto, la deformación ε a lo largo del espécimen puede asumirse que es uniforme, y la elongación total Δl del espécimen puede ser expresado en términos de la longitud del espécimen l (Figura 7).

$$\Delta l = \varepsilon l \quad (15)$$

Una zona de proceso de fractura comienza a desarrollarse justo después de que el pico de carga ha sido alcanzado. En el modelo, se asume que esta zona se forma simultáneamente a través de toda la sección transversal. Conforme la elongación total se incrementa, el esfuerzo decrece y la región fuera de la zona de fractura experimenta una descarga, mientras que dentro de la zona de fractura, hay un ablandamiento. La zona de fractura permanece localizada y no se esparce a lo largo del espécimen, esto es llamado “deformación localizada”, algo parecido a lo que se ve en plasticidad. Más allá del esfuerzo pico, la elongación total del espécimen es la suma de la deformación uniforme fuera de la zona de fractura y la deformación localizada adicional w que existe dentro de la zona de fractura, como se muestra en la Figura 7-b.

$$\Delta l = \varepsilon l + w \quad (16)$$

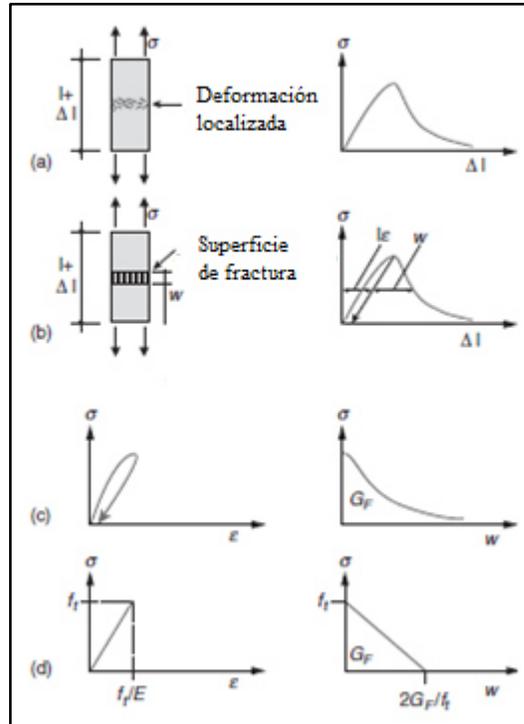


Figura 7. Modelo de la grieta ficticia; (a) comportamiento estructural realista; (b) modelo del comportamiento estructural; (c) modelo para la descripción de las propiedades del material; (d) propiedades simplificadas del material ^[14]

Como se ilustra en la Figura 7-c, se necesitan dos relaciones para caracterizar el comportamiento mecánico del concreto en tensión: 1) una relación esfuerzo-deformación (σ - ε) para la región fuera de la zona de fractura y 2) una relación esfuerzo-elongación (σ - w) para la zona de fractura.

2.2 Fractografía

La fractografía es la interpretación de las características obtenidas en una superficie de fractura. A través de la fractografía es posible analizar cualitativamente las condiciones que generan y propagan las grietas en una superficie de fractura. Esto es posible por medio de un análisis microscópico en el microscopio electrónico de barrido (MEB).

Los límites de grano, precipitados de segunda base y la agrupación de dislocaciones (heterogeneidades micro-estructurales) tienen la capacidad de controlar la resistencia o propagación de una grieta y pueden ser claramente identificadas en la superficie de fractura en materiales complejos, pues provee una relación con las heterogeneidades micro-estructurales.

2.2.1 Fractura dúctil y frágil

Una fractura dúctil ocurre después de una intensa deformación plástica y se caracteriza por una lenta propagación de la grieta. Comienza con la formación de un cuello y cavidades dentro de la zona de estrangulamiento. Luego las cavidades se fusionan en una grieta en el centro de la muestra y se propaga hacia la superficie en dirección perpendicular a la tensión aplicada. Cuando se acerca a la superficie, la grieta cambia su dirección a 45 ° con respecto al eje de tensión y resulta una fractura de cono y embudo.

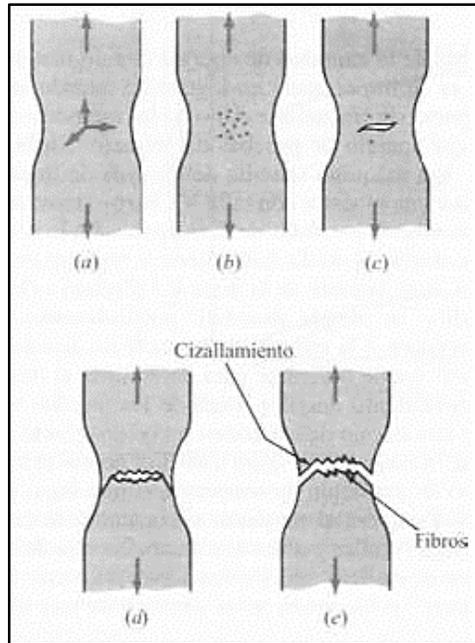


Figura 8. Etapas de una fractura dúctil [ref]

La fractura frágil se produce a lo largo de planos cristalográficos llamados planos de fractura y tiene una rápida propagación de la grieta. Esta fractura tiene un lugar sin una apreciable deformación y debido a una rápida propagación de una grieta. Normalmente ocurre a lo largo de planos cristalográficos específicos denominados planos de fractura que son perpendiculares a la tensión aplicada. La mayoría de la fracturas frágiles son transgranulares o sea se propagan a través de los granos. Pero si los límites de grano constituyen una zona de debilidad, es posible que la fractura se propague intergranularmente. Las bajas temperaturas y altas deformaciones favorecen la fractura frágil.

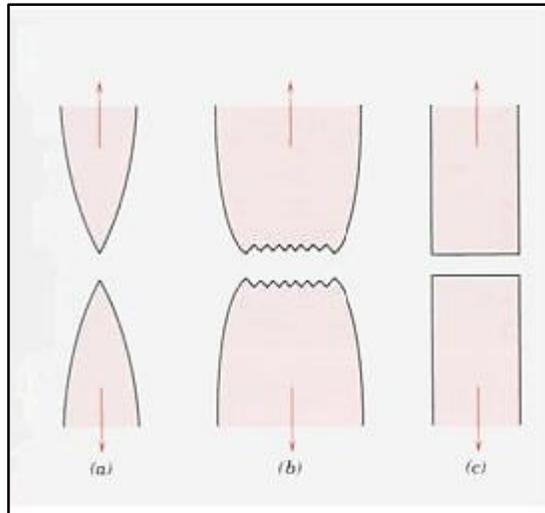


Figura 9. Superficies obtenidas por diferentes tipos de fractura[ref]
 a) Fractura dúctil, b) Fractura moderadamente dúctil, c) Fractura frágil sin deformación

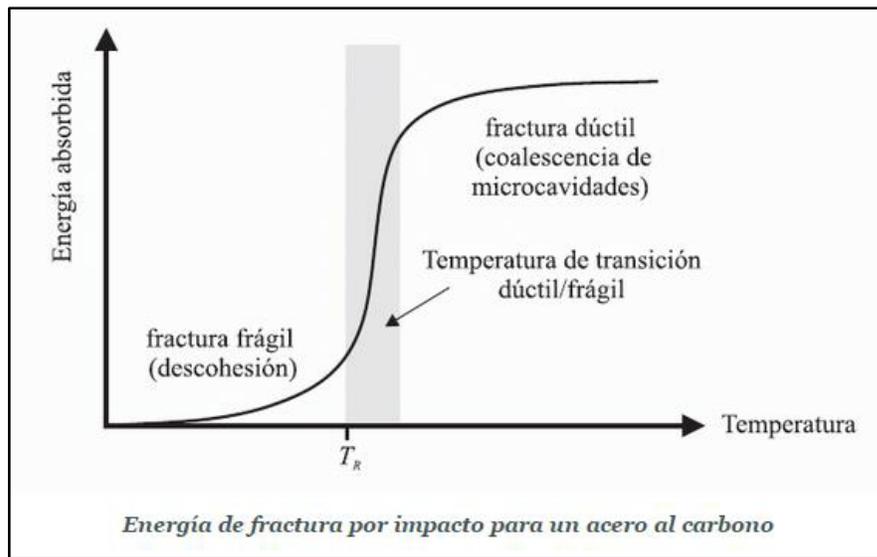


Figura 10. Representación de una fractura frágil vs fractura dúctil [ref]

2.2.2 Fractura de compositos particulados

En muchas aplicaciones, la fractura frágil limita el uso de los materiales cerámicos. En la industria electrónica, por ejemplo, los cerámicos son usados como sustratos y dieléctricos por sus propiedades eléctricas, sin embargo, el fracaso en estas aplicaciones a menudo es causada por la fractura por fragilidad, que resulta de la falta de coincidencia de expansión térmica entre las partes cerámicas y metálicas de los paquetes electrónicos. Para entender el comportamiento de fractura de los materiales cerámicos, es necesario entender los mecanismos de fractura de estos materiales que son completamente frágiles, un ejemplo es la figura 11. En estos materiales la deformación plástica mediante el movimiento de dislocaciones no sucede, o se produce a una extensión limitada de tal manera que las grietas son nítidas a nivel atómico del sólido. La resistencia a la fractura es proporcionada por la misma red cristalina, y no por el movimiento de las dislocaciones ^[16].

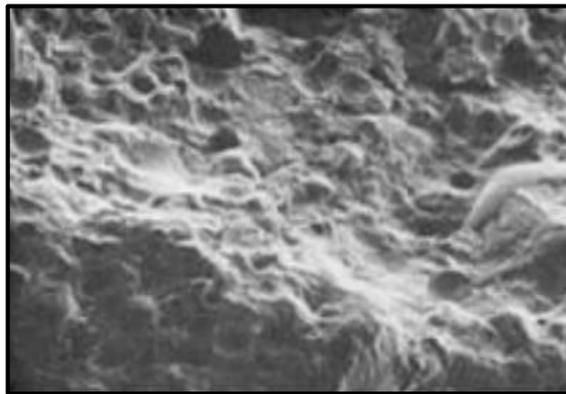


Figura 11. Imagen obtenida por electrones retrodispersados (BE) de una superficie de concreto con huecos no interconectados entre sí, $17 \times$ ^[17].

Un ejemplo importante de fractografía en materiales cerámicos son los patrones “mirror”, “mist” y “hackle”. Este fenómeno es una buena herramienta para el estudio de problemas

de fractura. La figura 12 muestra este tipo de patrón en una superficie de fractura de vidrio inorgánico que fue sometido a tensión.

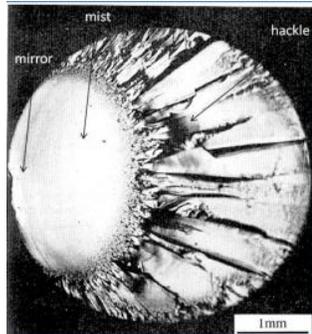


Figura 12. Patrón de fractura “mirror”, “mist” y “hackle” en una probeta de vidrio sometida a tensión. ^[13]

Los siguientes fenómenos son identificados en este tipo de patrón de fractura: 1. Los cambios de apariencia en la superficie de fractura están asociados con el incremento de la rugosidad en la superficie. 2. Las transiciones de “mirror” a “mist” y de “mist” a “hackle” no están alineadas, el fenómeno está relacionado con los cambios progresivos de la rugosidad de la superficie. 3. Los cambios en la rugosidad son secuenciales y están asociados con el cambio de la longitud de las grietas. En la figura 13 se tiene un esquema del patrón “mirror”, “mist” y “hackle” generado en una muestra (con muesca) ensayada en tensión, la muesca provoca que exista una concentración de esfuerzos en la punta de la grieta, al cumplirse la condición 49 de Griffith, la grieta comenzará a propagarse bajo carga constante y así la longitud de la grieta se incrementará, lo que significa que se generará una fractura inestable. Los valores altos de esfuerzos y la gran cantidad de energía liberada rápidamente producen mucha actividad micromecánica en la punta de la grieta y el incremento de la rugosidad en la superficie lo que da como resultado este tipo de patrón.

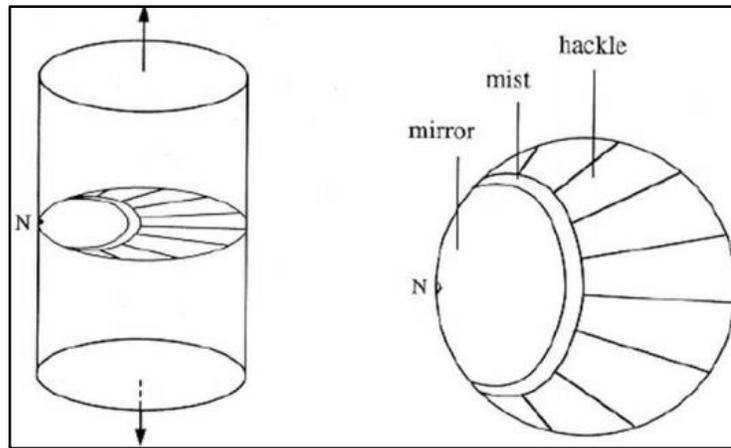


Figura 13. Esquema del desarrollo del patrón “mirror”, “mist” y “hackle” en tensión. [18]

2.2.3 Fractografía en materiales frágiles

Los materiales cerámicos, vítreos y cristalinos se les consideran materiales frágiles y sus superficies de fractura muestran varias regiones diferenciadas. Para materiales compuestos no es posible generalizar las características de las superficies de fractura, así como posibles trayectorias de las grietas, pues dependen de los múltiples tipos diferentes de refuerzos y de matrices. Las superficies de fractura de materiales compuestos muestran el tipo de mecanismo de refuerzo que ha actuado durante el proceso de fractura.

2.2.4 Rotura de materiales cerámicos

Los materiales cerámicos como el concreto son los que más se aproximan a la hipótesis de comportamiento elástico hasta la ruptura. Aunque es conocido que las cerámicas presentan mecanismos con deformación inelástica, el efecto de éstos es muy inferior al de deformación plástica característico de los metales. Los materiales cerámicos contienen

un elevado número de microfisuras de tamaño y orientación variables, por lo tanto no es posible predecir la resistencia a ruptura, puesto que está relacionada con las características como orientación, longitud, posición, etc., de la mayor microfisura presente, las cuales son desconocidas. El tamaño de la mayor microfisura presente en una pieza dependerá del volumen de está, ya que cuanto mayor sea el volumen habrá fisuras mayores. ^[19]

2.2.5 Geometría de fractales y autofinidad

El primer concepto surgió por Henri Poincaré en 1890, más tarde Pierre Fatou y Gastón Julia publicaron un concepto más amplio. En 1974 el Dr. Mandelbrot elaboro una serie de experimentos computacionales en los laboratorios de IBM, donde surgió la teoría de la geometría fractal, convirtiendo al Dr. Mandelbrot en el padre de esta disciplina.

A cualquier objeto o estructura que consista en fragmentos y tenga una orientación o tamaño variable pero a simple vista tenga un aspecto semejante, es decir, que posea autosimilitud a cualquier escala, se le considera objeto fractal. Un ejemplo de ello, seria al enfocar una porción cualquiera de un objeto fractal en un microscopio y notar que tal porción resulta ser una réplica a una menor escala del objeto original. Una característica de los objetos fractales es que solo cuentan con una dimensión numérica, que es un índice matemático que es posible calcular y permite cuantificar las características de los objetos o fenómenos fractales y sus dimensiones es fraccionaria. ^{[20] [21]}

En la formación de fractales intervienen las denominadas iteraciones. Una iteración es la repetición de "algo" una cantidad "infinita" de veces. Entonces, los fractales se generan a través de iteraciones de un patrón geométrico establecido como fijo.

Mandelbrot señala un punto importante dentro del concepto de fractal. Un cuerpo de este estilo debía contar con una "dimensión", pero no como se puede pensar a primera vista, sino que una dimensión numérica. El mismo, adoptó el término "dimensión fractal" para reemplazar lo que se conoce como la dimensión de Hausdorff-Besicovitch.

La dimensión fractal D , como se verá, es una generalización de la dimensión euclidiana (DE), es un índice matemático que podemos calcular y que nos permite cuantificar las características de los objetos o fenómenos fractales.

2.2.6 Cálculo de la dimensión fractal

Debido a que un objeto fractal lo constituyen elementos cada vez más pequeños. Cuando se quiera realizar una medición de una línea fractal con una unidad o algún instrumento, siempre habrá proporciones del objeto que no podrán ser medidos. Un ejemplo de este fenómeno es la curva de Koch, que en cada paso en la génesis de la curva aumenta un tercio de su longitud. Es decir la longitud de la curva que ocupa el espacio inicial va aumentando en cada paso su longitud de forma indefinida como se observa en la figura 14, de este modo la curva aumentaría indefinidamente su longitud.

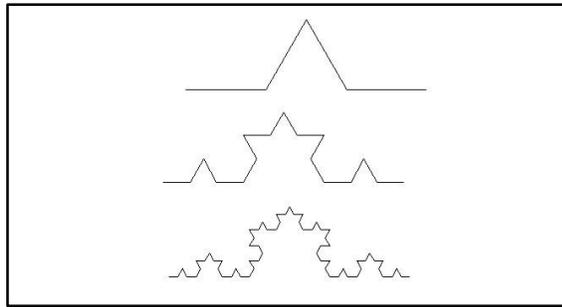


Figura 14. Construcción de la curva de von Koch. ^[21]

Como la longitud de la línea fractal depende de la longitud del instrumento o de la unidad de medida, se utiliza el concepto de la dimensión fractal, donde las líneas fractales indican de qué forma o medida una línea fractal llena una porción de plano. En la geometría clásica un segmento tiene dimensión uno, un círculo tiene dimensión dos, y una esfera tiene dimensión tres. Félix Hausdorff en 1919 conceptualizó la dimensión definida, que más tarde fue perfeccionada por Besicovitch. La dimensión Hausdorff (X) de un objeto fractal X mide el número de conjuntos de longitud L que hacen falta para cubrir X por L . La dimensión fractal es una generalización de la dimensión euclídea. Si comenzamos de un segmento de longitud 1, y lo fraccionamos en partes de longitud L , obtendríamos $N(L)$ partes, de manera que:

$$N(L) \cdot L^1 = 1 \quad (17)$$

Cualquiera que sea L :



Figura 15. División de un segmento de recta de longitud en $N(L)$ partes.

Al ser cuadrado el objeto inicial de superficie uno, y lo comparamos con uniones cuadradas, cuyo lado tenga una longitud L , el numero de unidades requeridos para recubrirlo $N(L)$, cumple:

$$N(L) \cdot L^2 = 1$$

cualquiera que sea L :

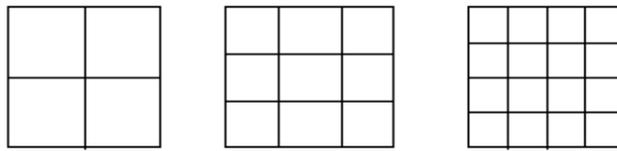


Figura 16. División de un cuadrado de área 1 en $N(L)$ elementales de lado L [22]

La dimensión fraccionaria fractal, e incluso el grado de irregularidad constante a diferentes escalas. Si el objeto que seleccionamos es tridimensional, como, por ejemplo, un cubo de volumen uno (ver figura 17), y realizamos la medición en relación con unidades que sean cubos de arista L , entonces se cumple que:

$$N(L) \cdot L^3 = 1$$

Cualquiera que sea L :

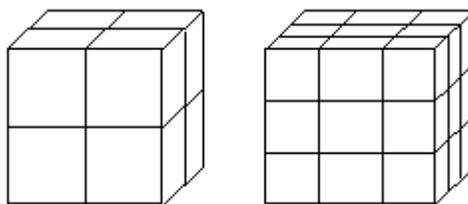


Figura 17. Visión de un cubo de volumen 1 en $N(L)$ cubos elementales de arista igual a L . [22]

Resumiendo podemos generalizar que una dimension de cualquier objeto geometrico es D si:

$$N(L)*L^D = 1 \quad (18)$$

Donde N(L) es el número de objetos elementales, o de unidades, de tamaño L que recubren, o que completan el objeto.

De donde deducimos, despejando D, que:

$$D = \log N(L)/\log(1/L) \quad (19)$$

Por último, un objeto es fractal solo cuando su dimensión fractal (D) es mayor que su dimensión euclidiana (DE):

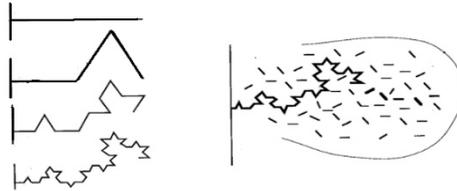
$$D > DE \quad (20)$$

2.2.7 Autosimilitud y autofinidad

Los objetos autosimilares son objetos fractales que a cualquier escala se observa un subconjunto que resulta ser idéntico al objeto original. A ciertos objetos, dado su estructura, llevan por nombres “fractales naturales” que son diferentes en sus contrapartes por ser entidades finitas en lugar de infinitas y por presentar similitud estadística o autofinidad a distintas escalas de observación. Un ejemplo de fractales naturales son las superficies de fractura, las nubes, arboles, montañas y los ríos. ^[21]



a) Perfil de una superficie de fractura real.



b) Curva de Koch y modelo de la propagación de una grieta dentro de la zona de proceso.

Figura 18. a) perfil de rugosidad de una superficie de fractura de con concreto obtenido mediante un perfilómetro mecánico. b) modelo que representa la propagación de una grieta dentro de la zona de proceso. ^[22]

2.2.8 Superficies de fractura: objetos autofines

El estudio de superficies de fractura proporciona importante información de parámetros, que caracterizan la rotura del componente o espécimen de laboratorio, por ejemplo:

- Mecanismo de propagación de la fisura
- Fractografía del material
- Configuración de tensiones: distribución y magnitud
- Medio químico
- Origen de la fractura.

El principal objetivo que se busca con este análisis es determinar el punto de origen de la fractura, pues la fractografía es el estudio de las superficies de fractura con ayuda de patrones llamados fractogramas, en su análisis, se observan las causas que provocaron la fractura que mayormente, las fracturas siguen un patrón repetido he intervienen los fractales. Los resultados del estudio en metales de Mandelbrot en 1984, concluyen que existe una relación entre la energía de impacto y la dimensión fractal de las superficies ^[23].

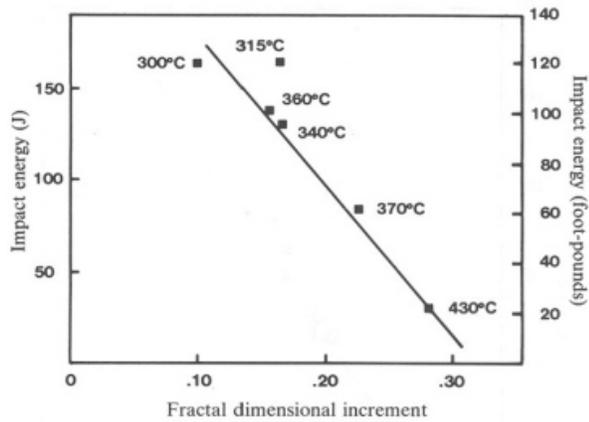


Figura 19. El histórico resultado de Mandelbrot que estableció una relación entre al energía de impacto y la dimensión fractal de las superficies de fractura en aceros tipo Maragin.^[24]

Las superficies de fractura se consideran autofines, es decir, tienen una semejanza a diferentes escalas de observación en el sentido estadístico, además, obedecen una transformación autofin, por ejemplo:

$$(x, y, z) \rightarrow (bx, by, b^{\zeta}z) \quad (21)$$

Donde x, y, z corresponden a las coordenadas de cada punto sobre la superficie de fractura, b es el factor de escala y ζ es el exponente de rugosidad.

2.2.9 Leyes de escalamiento y métodos para determinar el exponente de rugosidad

Las siguientes ecuaciones discuten la caracterización de escalamiento en superficies de fractura y estiman el exponente de rugosidad o exponente de Hurst.

$$\Delta h(l) = \left\{ \frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} h(z_i)^2 - \left(\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} [h(z_i)] \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

El segundo término del lado derecho de la ecuación indica la altura media, elevada al cuadrado, de los puntos que se encuentran dentro de una ventana de análisis de tamaño l , el primer término del lado derecho, representa la sumatoria del valor de todos los puntos contenidos dentro de la ventana de análisis de tamaño l elevados al cuadrado, al restar estos dos términos obtenemos una medida de la dispersión de las alturas dentro de la ventana de análisis, esto es Δh . Así vemos pues, que el valor de Δh siempre es positivo y que entre menor sea este, hay menos dispersión de las alturas, lo cual a su vez se ve reflejado en una superficie más lisa o “menos rugosa”. [25]

El método de ventana de ancho variable consiste en los siguientes pasos, una ventana de tamaño l (Figura 20-a) se posiciona en punto $i=0$, dentro de esta ventana hay una cantidad de puntos N_p , para estos puntos se calcula el parámetro Δh descrito previamente con la ecuación 22, una vez hecho esto, se traslada la ventana a la nueva posición $i+1$ (un punto hacia la derecha en este caso), se vuelve a calcular el parámetro Δh , y se repite el proceso

anterior hasta que se hayan analizado todos los puntos del perfil, como tercer paso se calcula el promedio del parámetro Δh para ese tamaño de ventana.

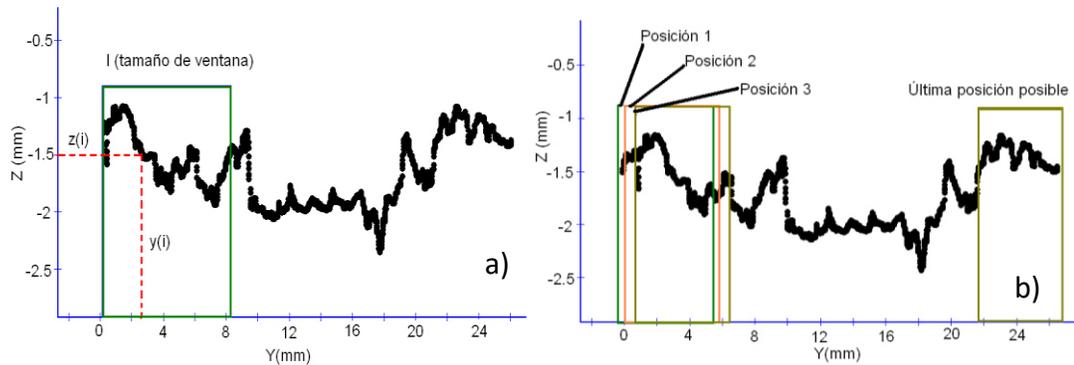


Figura 20. Esquema representativo del método de ventana de ancho variable, a) cálculo de la rugosidad media cuadrada (rms) dentro de una ventana de análisis de tamaño l , b) traslado de la ventana de análisis de tamaño l hasta analizar todo el perfil de fractura.

Para perfiles autoafines, si se construye un gráfico de $\log \Delta h$ vs $\log l$ (Figura 20), se cumple que la rugosidad media cuadrada de la superficie de fractura se comporta según la relación:

$$\begin{aligned} \Delta h &\sim l^\zeta \text{ para } l \ll \xi \\ \Delta h &\sim \text{cte} \text{ para } l \gg \xi \end{aligned} \quad (23)$$

Donde Δh representa la rugosidad media cuadrada, l es el tamaño de la ventana de análisis, ζ (pendiente de la curva en el gráfico $\log \Delta h$ vs $\log l$) representa el exponente de rugosidad y ξ es la longitud de correlación, la cual es el tamaño de la ventana de análisis a partir de la cual la rugosidad puede considerarse constante. A este comportamiento se le conoce en la literatura referente a *crecimiento* de superficies como escalamiento de Family-Vicsek

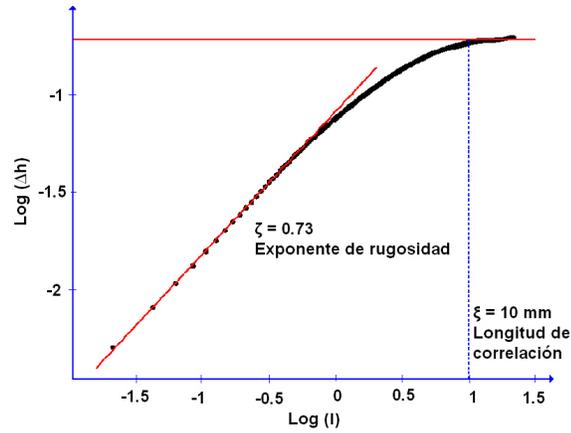


Figura 21. Representación gráfica del escalamiento de la rugosidad $\Delta h \sim l^\zeta \ll \xi$ y $\Delta h \sim cte \gg \xi$ en un perfil de fractura real. [26]

2.2.10 Escalamiento anómalo

Este tipo de escalamiento se analiza a nivel global, es decir el sistema en conjunto, así como el escalamiento a nivel local en ventanas pequeñas respecto al tamaño del sistemas o bien en tamaños variables. Es decir, se introducen diferentes exponentes de rugosidad, uno llamado global ζ_g , y otros denominado locales, ζ y ζ_e ; este tipo de comportamiento se puede descubrir por medio de un escalamiento como el siguiente. [27]

$$\Delta h(l, x) \sim l^\zeta x^{\left(\frac{\zeta_g - \zeta}{z_x}\right)} \text{ si } l \ll x^{\frac{1}{z_x}}$$

$$\Delta h(l, x) \sim l^{\zeta_e} x^{\left(\frac{\zeta_g - \zeta_e}{z_x}\right)} \text{ si } l \gg x^{\frac{1}{z_x}} \quad (24)$$

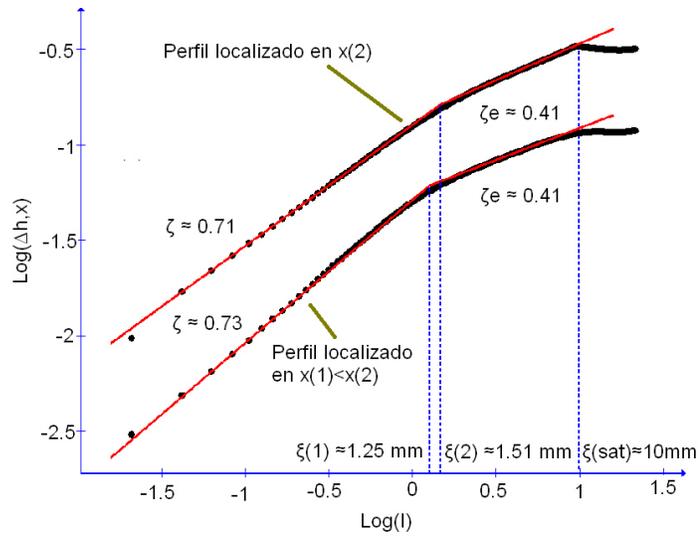


Figura 22. Escalamiento anómalo. Análisis de escalamiento de las superficies de fractura de unas barras de mortero, a las barras se les maquinó una muesca y fueron fracturadas mediante un ensayo de flexión a cuatro puntos. $x(1)$ se refiere a la distancia a la que se encuentra el perfil de análisis respecto a la muesca. Puede notarse que a medida que se analizan perfiles más alejados de la muesca, hay un incremento en la longitud de corte ξ de 1.25mm a 1.51. Nótese también la presencia de los dos exponentes locales $\zeta \approx 0.72$ y $\zeta_e \approx 0.74$. [27]

CAPÍTULO

III

ESTADO DEL ARTE

El primer gran aporte en la mecánica de fractura fue realizado por Irwin en 1957, pues planteó el análisis en términos de tensiones (formulación tensional), pues en años anteriores no era posible debido a que teóricamente en la punta de la grieta los esfuerzos tienden a infinito, independientemente de la magnitud de la carga aplicada. Después siguieron diversas investigaciones referentes al escalamiento de las superficies de fractura así como su relación con los efectos de tamaño tal y como se describe a continuación.

Víctor E. Saouma, Christopher C. Barton y Negad A Gamaleidins ^[28], en 1990 caracterizaron la rugosidad de la superficies de especímenes de concreto utilizando la geometría fractal con un perfilómetro para obtener los datos topométricos de cada superficie. Concluyo que las superficies de fractura son fractales hasta un rango de observación de dos órdenes de magnitud con una dimensión fractal de $D= 1.20$

A.M Brandt y G. Prokopski ^[29], en 1993 encontraron la relación entre la dimensión fractal en una superficie y la tenacidad a la fractura expresada por el factor de intensidad de esfuerzos. Concluyendo que para el modo II de fractura, es mayor la tenacidad al tener una mayor dimensión fractal.

Alberto Carpinteri, Pietro Cornetti y colaboradores, contribuyeron en 1994 con la descripción teórica de la relación que existe en los agregados en la falla a la tensión en los especímenes de concreto. Argumentaron los patrones fractales de las grietas en concreto y su relación con los efectos de tamaño a consecuencia de la distribución de agregados.

[30]

Alberto Carpinteri y Bernardino Chiaia ^[31], en 1995, al fracturar especímenes de concreto en tensión directa encontraron que la energía de fractura nominal se incrementa con el tamaño de los especímenes y tienden a seguir una tendencia no lineal.

En 1997, Zdenek P. Bazant ^[32], encontraron que las características fractales de la superficie de fractura o de los conjuntos de microgrietas no tienen influencia en la ley de escalamiento para las cargas de falla, pero puede llegar a afectar las características de las fracturas.

Stéphane Morel, Jean Shmittbuhl, Juan M. López y Gerard Valentin ^[33], en 1998 encontraron que en dos tipos de madera de tres tamaños diferentes las superficies de fractura presentan un escalamiento anómalo, teniendo como resultado que el exponente global es un buen índice para la caracterización. También encontraron una relación lineal entre el tamaño del espécimen y la longitud de correlación.

En el 2000, M. Hinojosa, E. Bouchaud y B. Nghiem ^[34], estudiaron una superaleación base níquel con dos diferentes tamaño de grano, se obtuvieron datos topométricos de sus superficies por medio del MEB (Microscopio Electrónico de Barrido) y un MFA (Microscopio de Fuerza Atómica). Encontraron que la longitud de correlación está en función del tamaño de grano presente en el material.

Viktor Mechtcherine ^[35], a finales del 2000 contribuyó en la existencia de una correlación entre la dimensión fractal y la resistencia, en tres tipos de concreto, donde analizó sus características fractales de las superficies así como la rugosidad de cada uno de sus componentes (agregados y cementante).

G. Prokopski y B. Langier ^[36] en el 2000, efectuaron un estudio en superficies de concreto para el análisis de las propiedades de escalamiento y su relación con la tenacidad. Con el aumento del factor de concentración de esfuerzos la dimensión fractal decrece pues argumentan que el decremento del valor de la dimensión fractal con el incremento de la tenacidad a la fractura se debe al aumento de la resistencia en la zona de transición, pudiendo concluir que a mayor relación agua/cemento mayor es la dimensión fractal.

En 2001, Lech Czarneck, Andrzej Garbacz y Joanna Icurach ^[37], trabajaron con superficies de fractura de un concreto polimérico con distinta microestructura, se analizaron los efectos de tamaño en las características geométricas. Concluyen que con el aumento en la escala de observación para el cálculo fractal, la dimensión fractal decrece.

L.T. Dougan, P.S Addison y colaboradores ^[38], en 2001, efectuaron un estudio de las propiedades de escalamiento en superficies de concreto. Mediante ensayo de flexión se fracturo a tres puntos una viga de concreto y la superficie de fractura se visualizó a varias magnificaciones a través del SEM. La dimensión fractal fue calculada para 50 muestras usando el método de la ventana de ancho variable. Los resultados indicaron que la dimensión fractal tiende hacia una alta magnificaciones, indicando un retorno a formas euclidianas. Esto sugiere que la superficie de fractura tiene un corte del comportamiento autofin en la región de 0.63 a 4.57 nm.

Z.X Zhang, J. Yu, S. Q. Kou y P.A. Lindquist ^[39], en 2001, realizaron un estudio en superficies de fractura en rocas magmática, donde se calculó la dimensión fractal a través de la fractura a distintas velocidades con aplicaciones de carga. Se relacionó la dimensión fractal y la tenacidad a la fractura de una roca teniendo como conclusión que existe un

incremento en la dimensión fractal al aumentar la velocidad de aplicación de carga y la dimensión fractal incrementa con el aumento de la tenacidad de fractura.

En 2002 S. Morel, E. Bouchaud, J. Schmittbuhl y G. Valentin ^[40] investigaron la posible relación entre la morfología de las superficies de fractura y los mecanismos de endurecimiento que presentan los materiales cuasifrágiles. Muestran que la morfología de las superficies está relacionada con el comportamiento de la curva R.

M. Hinojosa y J. Aldaco, en 2002, generaron superficies de fractura en aluminio con ensayos de impacto y de tensión. Mediante análisis de MFA, MEB y un perfilometro se pudo conocer en forma topométricamente cada superficie analizada. Con un valor cercano a 0.78 fue el valor encontrado para el exponente de rugosidad y la longitud de correlación está en el orden de los tamaños de grano, concluyendo que las heterogeneidades de gran tamaño que se encuentran en el material son las que determinan la longitud de correlación de la superficie de fractura. ^[41]

T. Babadagli, K. Develi y colaboradores ^[42], en 2003, mediante ensayos de tensión analizaron las propiedades fractales de superficies de fractura en rocas. La velocidad de carga y dimensión de fractal fueron los parámetros que encontraron una relación entre ellas, asumiendo una relación de la dimensión fractal con el tamaño de grano y la porosidad. En un mismo perfil de fractura obtuvieron diferentes dimensiones fractales, concluyendo con una anisotropía de la dimensión fractal.

An Yan, Ke-Ru Wu, Dong Zhang y Wu Yao ^[43], en 2003, estudiaron la dimensión fractal de las superficies de fractura en un concreto y el tipo de influencia que puede existir con la relación agua-cemento, tipo de agregado y tamaño máximo del agregado. Los resultados

indicaron que a una mayor relación agua-cemento la dimensión fractal se incrementa y con una misma relación agua-cemento, la dimensión fractal se incrementa con el tamaño del agregado.

C. S. Velasco Aguilar, F. Casanova del Ángel, ^[44], en 2004, investigaron la relación que existe entre fracturas en elementos de concreto y los fractales. El principal objetivo radica en obtener el mejor fractal que sea adecuado al estudio de las fracturas en las probetas de concreto que fueron realizadas y se encontró la dimensión fractal de las grietas en las probetas de concreto.

G. Mourot, S. Morel, E. Bouchaud y G. Valentín ^[45], en 2005, realizaron estudios en probetas de mortero donde estudiaron sus propiedades de escalamiento de superficies mediante el Modo I de fractura. Basándose con el escalamiento anómalo para la descripción de las superficies, concluyen que la generación de la rugosidad que presenta un escalamiento anómalo puede estar relacionado a la zona de proceso de la fractura.

Alberto Carpinteri y Simone Puzi ^[46], en 2005, describen el escalamiento anómalo como una equivocada consideración para explicar los efectos de tamaño.

L. Ponson, D. Bonamy, G. Mourot y E. Bouchaud ^[47], en 2006, en superficies de fracturas de un vidrio, aleación de aluminio, madera y mortero, investigaron sus propiedades de escalamiento. Obtuvieron un exponente de rugosidad medido a lo largo de la dirección de la grieta que es diferente al medido a lo largo de la dirección de propagación.

L. Ponson, H. Auradou, M. Pessel, V. Lazarus y J. Hulin ^[48], en 2007, plantearon una relación entre los mecanismos de falla en rocas y la morfología de la superficie de fractura. Con muestras de diferentes espesores, se obtuvo una rugosidad de 0.46. Se concluyó que

la rugosidad no depende del grosor de la muestra, lo que asegura que no existe escalamiento anómalo como lo hay en otros materiales.

S. Morel, D. Bonamy, L. Ponson y E. Bouchaud ^[49], en 2008, realizaron estudios de las propiedades de escalamiento en superficies de fractura de mortero. Concluyen que la dependencia del material es de su exponente global ya que se obtuvieron tres exponentes de rugosidad, dos de ellos asociado a la rugosidad local (0.8 y 0.4) y un tercero que se asocia a la rugosidad global (1.60).

M. Hinojosa, E. Reyes Melo, Claudia Guerra, Virgilio González y Ubaldo Ortiz ^[50], en 2008, generaron superficies de fractura en vidrios para evaluar su morfología y propiedades de escalamiento. Con ensayos a flexión se generaron superficies de fractura y se obtuvo un análisis por dos métodos, resultando la formación de tres diferentes distribuciones estadísticas del exponente de rugosidad. Se encontró un exponente de rugosidad de 0.5 al principio de la zona del espejo, en la zona difusa a escalas grandes el exponente de rugosidad fue de 0.8. Concluyen que para velocidades lentas de propagación de una grieta domina el exponente de rugosidad de 0.5 y mientras para altas velocidades de propagación el coeficiente es de 0.8. Por último interpretan el régimen centrado con un valor de 0.6 como el resultado de un traslape entre los regímenes lento y rápido.

En 2009, Viktor Mechtcherine ^[51], realizó una serie de ensayos a tracción uniaxial, controlando la deformación con el fin de estudiar detalladamente el comportamiento mecánico de la fractura en superficies de concreto. Se elaboraron tres tipos de concreto a 28 días de curado. Concluyó que a mayor grado de heterogeneidad del concreto, los

valores de rugosidad y dimensión fractal aumentan pues estos resultados indican una mejor transferencia del esfuerzo de tracción a través de la grieta.

Y. Dong, S. Wu, S.S. Xu, Y. Zhang, S. Fang ^[52], en 2009, presentaron un análisis numérico en superficies de fractura en concreto para su posterior modelación. Los especímenes de concreto fueron ensayados a flexión en tres y cuatro puntos y por medio del criterio de rankine se generaron grietas. Los resultados fueron validados por los siguientes métodos; Método de elementos finitos, método EFG con criterio de visibilidad, método del segmento de la grieta. Las grietas fueron modeladas por un conjunto de segmentos de fisuras cohesivas.

Kyoungso Park, Glaucio H. Paulino, Jeffery Roesler ^[53], en 2010, estudiaron la fractura cohesiva en concreto armado, con el propósito de predecir el comportamiento de la fractura. Se realizaron ensayos a flexión a tres puntos y ensayos a tracción. Fueron añadidas fibras sintéticas a los especímenes de concreto y se definieron cuatro parámetros de fractura; energía inicial de fractura, energía total de fractura y desplazamiento de la fisura. Concluyeron con una funcionalidad gradual de sus modelos.

Alberto Varela y Moisés Hinojosa ^[54], en 2010, estudiaron la rugosidad de las superficies de fractura, concluyendo la presencia de propiedades de escalamiento en un amplio espectro de longitud y el aumento de la longitud de correlación medida en especímenes de mortero conforme al tamaño de los perfiles analizados. Se encontraron en las superficies de mortero que la rugosidad exhibe un escalamiento anómalo, con dos exponentes locales $\zeta \approx 0.75$ y $\zeta_{loc} \approx 0.4$. Se encontró que la magnitud de la longitud de correlación es proporcional al tamaño de los perfiles de fractura analizados. En el caso de

las superficies de concreto se encontró que la rugosidad, tanto en los agregados fracturados como en la pasta de cemento, exhibe propiedades de escalamiento, mostrando dos distribuciones del exponente de Hurst centradas en el valor de $\zeta \approx 0.8$.

Steve Werner, Karl-Christian Thinel y Andrea Kustermann ^[55], en 2012, reportaron el estudio de 10 superficies de fractura en concreto de una relación a/c de 0.60 a 28 días de curado que posteriormente fueron impactadas por un proyectil a una velocidad 870 m/s. El análisis consistió en un sistema de laser explorador de 3 dimensiones (x,y,z). Concluyen que los especímenes con un tamaño mayor de agregado absorben más energía del proyectil.

Wanzhen Wang, Xuding Qian y Baozheng Yang ^[56], en 2014, estudiaron la ruptura de cuatro vigas de acero tipo E50 que fueron rellenas de concreto sin ningún tipo de apertura. Los especímenes B1 y B2 cuentan con la misma dimensión de la base mientras que las dos restantes fueron diseñadas con distintas dimensiones. Se concluyó que hubo aumento en la ductilidad al rellenar las vigas con concreto pues la rotación plástica aumento en un 50 % en dos especímenes y se registró un índice máximo de fractura de 0.85.

F. Rezaie y S.M Farnam ^[57], en 2015, realizaron cinco vigas de concreto pretensado para estudiarlas a base de los principios de la mecánica de la fractura. Fueron ensayadas a flexión en tres puntos y se monitoreó el crecimiento de las grietas por medio de software de elementos finitos para después hacer la modelación de las vigas y calcular sus parámetros de fractura. Por último se validó el diagrama de carga-desplazamiento de los especímenes con el modelo numérico de elementos finitos para la validación del modelo.

Los resultados muestran que la expansión de la grieta aumenta la proporción de la profundidad de la grieta.

Mohammad Karamloo, Moosa Mazloom y Gholamhasan Payganeh ^[58], en 2016, estudiaron el tipo de influencias que ejerce el tamaño máximo de agregado en un concreto ligero autocompactable que fue ensayado a flexión en tres puntos. Se elaboraron seis tipos de concreto con diferentes relaciones agua/cemento. Concluyeron que al aumentar el diámetro máximo de agregado, la resistencia a la fractura aumenta, debido a los cambios que ocurren en las dimensiones fractales.

Janusz Konkol y Gregorz Prokopski ^[59], a mediados del 2016, realizaron un estudio de la resistencia a la fractura en concreto modificado con metacaolín. Los resultados arrojaron una alta tenacidad a la fractura al adicionar el metacaolín al concreto. Se aplicó la geometría fractal con un perfilómetro laser que permitió relacionar la morfología de las superficies de fractura con la tenacidad a la fractura. Basándose en un modelo estadístico se demostró que influye en gran parte la morfología de la superficie de fractura del concreto en la predicción del factor de intensidad de la tensión crítica (K_{Ic} S).

M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, en 2016 ^[60], estudiaron el comportamiento de la fractura en concreto por medio de la evaluación de los procedimientos de compactación, reología del concreto, métodos de llenado, forma, tamaño y longitud de las probetas. Los resultados fueron considerados mediante el análisis de la cantidad y distribución de fibras dentro de las superficies de fractura. El análisis se realizó dividiendo la sección de ruptura en nueve secciones iguales. Para la fabricación de especímenes se requirió cemento Portland y un aditivo mineral, se adiciono piedra caliza como un micro-

agregado de dos dimensiones. Los resultados sugieren que el comportamiento de post-fisuración que se encontró en cada probeta está estrechamente asociado con la cantidad de fibras y su posición.

El objetivo principal de los antecedentes surge a partir de la comparación de anteriores investigaciones en torno a la fractura en materiales cerámicos, principalmente en concreto. Del análisis del estado del arte resumido anteriormente, se puede concluir diversos aspectos, como que la magnitud de la longitud de correlación es proporcional al tamaño de los perfiles de fractura analizados y que el exponente global puede ser dependiente del material, contrario a los exponentes globales que pueden ser considerados universales.

Diferentes investigaciones desarrolladas sobre la influencia de la relación agua-cemento en la dimensión fractal concluyeron que a una mayor relación agua-cemento la dimensión fractal aumenta y para la misma relación agua cemento, la dimensión fractal aumenta con el tamaño de agregado. También se encuentran trabajos los cuales concluyen que la longitud de correlación de las superficies de fractura está determinada por las heterogeneidades más grandes en el material.

CAPÍTULO

IV

MOTIVACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Motivación, hipótesis y objetivos

La contribución en esta investigación se plasma en la siguiente motivación que surgió del análisis del estado del arte.

La fractura en el concreto ocurren usualmente por prácticas inadecuadas en la construcción, principalmente por tener un curado inadecuado, todo concreto tiene tendencia a agrietarse y según la literatura consultada, no es posible producir un concreto libre de grietas, sin embargo el desarrollo de grietas puede ser reducido y controlado a través de métodos básicos en construcción. Al observar y estudiar una superficie de fractura en el concreto se pueden obtener parámetros que ayudaran a caracterizar esa fisura, permitiendo determinar el origen o comienzo de la fractura. Con la mecánica de la fractura, se ha podido emplear en diseños de ingeniería para la prevención de grietas. Recientes publicaciones en ingeniería comprueban la necesidad de utilizar la geometría fractal como un método para descubrir las trayectorias de fracturas, a través de técnicas como MFA, MEB y digitalizadores tridimensionales que podrían ser utilizados en materiales compósitos particulados como el concreto y mortero.

El concreto y mortero se fabrican en estado plástico, y son indispensables en la construcción de la infraestructura que es primordial para la sociedad actual, por lo que estudiar su mecánica de fractura nos otorga parámetros para el entendimiento de su comportamiento. El concreto y el mortero son materiales compósitos particulados que presentan fases y características de interés a diversas escalas de observación, desde el nivel atómico hasta longitudes de centímetros o metros. Desde hace años se establecido para

objetos autofines como las superficies de fractura no es satisfactorio utilizar la dimensión fractal ^[61], por lo tanto se emplea los exponentes de Hurst o de rugosidad en esta investigación, por lo que se tomó en cuenta en esta investigación. En la literatura sobre escalamiento anómalo hacen referencia entre exponentes locales y exponentes globales así como efectos de tamaño con el escalamiento autofin en materiales como concreto y mortero, pero aún queda muchas preguntas sobre la relación que existe entre estos efectos.

Hipótesis

En materiales particulados como concreto y mortero, el análisis de sus respectivas superficies de fractura permitirá encontrar la relación que existe entre la influencia de los elementos particulados sobre el escalamiento autofin de las superficies de fractura.

Objetivo general

Aportar conocimientos referentes al escalamiento autofin de superficies de fractura en materiales como mortero y concreto (materiales compuestos particulados), así como efectos de tamaño, por medio de probetas de diferentes dimensiones sometidas a pruebas de flexión.

Objetivos específicos

1. Determinar en concreto y mortero el comportamiento autofin en forma global por medio de análisis topométricos.
2. Obtener muestras representativas de concreto fresco para la evaluación de las características físicas del concreto y mortero a través de las especificaciones indicadas en las normas vigentes.

3. Relacionar los datos topométricos obtenidos para la caracterización de las superficies de fracturas generadas.

CAPÍTULO

V

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta sección se describe la metodología experimental para la realización de esta tesis como se muestra en el diagrama de operación que corresponde a la figura 23. Se recolectaron y se prepararon los materiales más apropiados como materia prima que establecen las normas de la ASTM para la fabricación de los especímenes elaborados.

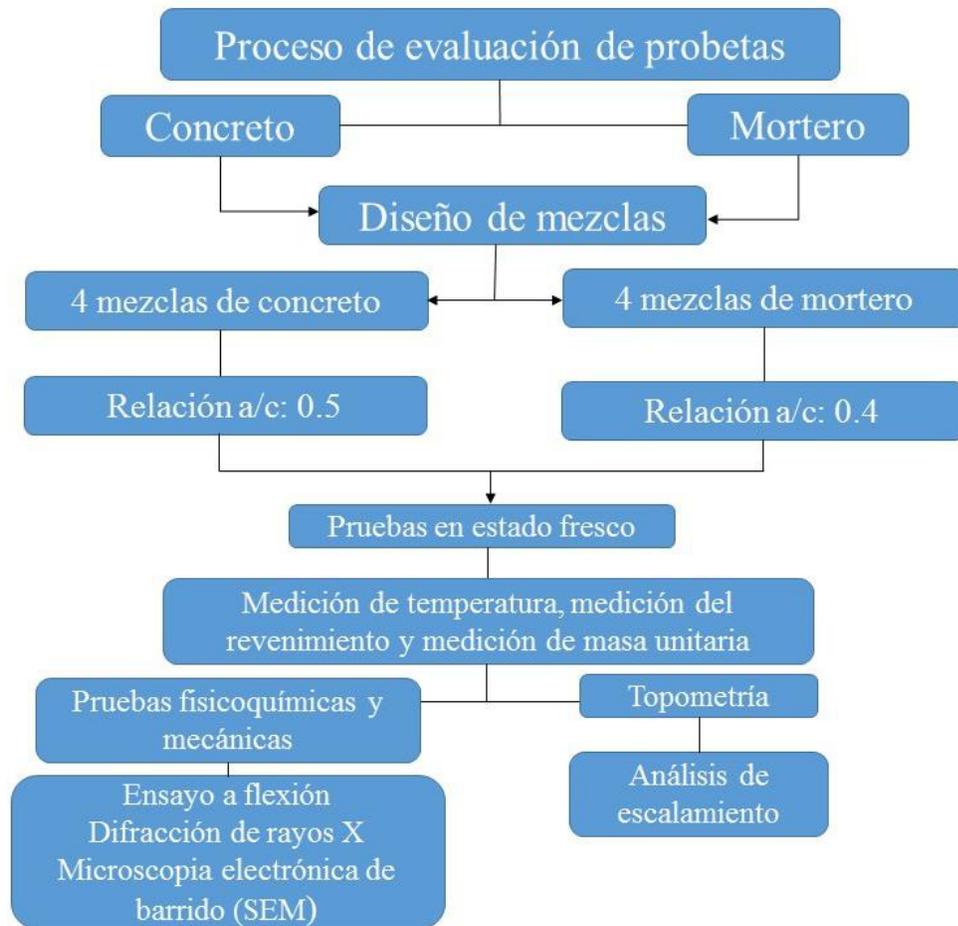


Figura 23. Metodología descrita en el diagrama de operación.

5.1 Diseño de mezclas teóricas

Para el diseño de cada mezcla se empleó un proporcionamiento basado en el libro ACI, en este caso fueron elaboraron mezclas de concreto y de mortero.

5.1.1 Proporcionamiento

La elaboración de vigas de concreto y mortero se llevó a cabo mediante la mezcla de las materias primas (grava, arena y cemento CPO 40), de acuerdo con las proporciones indicadas que se muestran en la tabla 1. La relación agua/cemento fue distinta para el concreto y el mortero en las 2 mezclas que fueron realizadas.

TABLA I
PROPORCIONAMIENTO PARA MEZCLA DE 40 LITROS DE MORTERO

Mezcla 1			
Materiales	Masa (gr)	Densidad (gr/cm ₃)	Volumen (ml)
Cemento CPO 40	7,458	3.100	2,405.80
Agregado fino	41,525	2.667	15,971.15
Agregado grueso	--	--	--
Agua	6,561	1.00	6,561
Aditivo	19	1.040	18.81
Total	55,563	--	24,956.76

TABLA II
PROPORCIONAMIENTO PARA MEZCLA DE 50 LITROS DE CONCRETO

Mezcla 2			
Materiales	Masa (gr)	Densidad (gr/cm ³)	Volumen (ml)
Cemento CPO 40	9,323	3.100	3,007.41
Agregado fino	49,173	2.667	18,437.57
Agregado grueso	47,576	2.698	17,663.80
Agua	10,403	1.00	10,403
Aditivo	23	1.040	22.11
Total	116,498	--	49,523.89

5.2 Adquisición y preparación de materiales.

Las vigas de concreto y mortero fueron preparadas con Cemento Portland Ordinario (CPO 40) de una marca disponible en la región, que cumple con la norma mexicana para cementos en México, NMX-C-414-ONNCEE-2004 ^[62]. De acuerdo a su clase de resistencia CPO 40 tiene una resistencia a la compresión mínima de 408 kg/cm² a los 28 días. Fue utilizado agregado grueso No. ¾ y agregado fino No. 4 como material de sustitución.

5.3 Caracterización de la materia prima

Con base en las normas ASTM, se realizaron las pruebas físicas, químicas y morfológicas a los materiales utilizados en esta investigación.

5.4 Pruebas físicas

5.4.1 Densidad del cemento

Con la norma ASTM C188, se obtuvo la densidad del cemento hidráulico. Se utilizó un frasco Le Chatelier, el cual se llenó con queroseno a un punto en el vástago entre el 0 y la marca de 1 ml. Se secó su interior por encima del nivel del líquido. La primera lectura fue registrada después de que el frasco fue sumergido en el baño de agua a una temperatura constante. En una balanza de precisión de 0.05 gramos se pesó la cantidad de 64 gramos de cemento Portland para después vaciar el cemento en el interior del matraz por encima del líquido. Posteriormente, se colocó el tapón del matraz para después ser rodado suavemente en un círculo horizontal, con el fin de liberar las burbujas de aire atrapadas dentro del matraz. Al finalizar, se sumergió en baño de agua a una temperatura constante y fue tomada la lectura. ^[63]

La diferencia entre la primera y los valores finales representa el volumen del líquido desplazado por la masa del cemento, lo cual permite determinar la densidad del cemento.

5.4.2 Densidad de agregados gruesos y finos

El valor de la densidad de los agregados utilizados para las mezclas de concreto y mortero se obtuvo de lo que existe reportado en la literatura.

5.4.3 Tamaño de partícula del cemento portland ordinario (CPO)

Se determinó el tamaño máximo de la partícula del material cementante por medio del equipo Analysette 22 NanoTec.

5.5 Preparación de mezclas

Se elaboró una mezcla de 50 litros de concreto con una relación agua/cemento de 0.50 y una de 40 litros de mortero con una relación agua/cemento de 0.40 y se establecieron tiempos de mezclados para una mayor homogenización de los materiales.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS

No	Composición		Pruebas en estado fresco		
	Relación agua/cemento	N° de Granulometría de agregados	Medición de temperatura	Revenimiento	Determinación de masa unitaria
Concreto	0.50	3/4	Realizado	Realizado	Realizado
M1					
M2					
M3					
M4					
Mortero	0.40	4			
M5					
M6					
M7					
M8					

5.6 Identificación de mezclas

A continuación se describe cada mezcla realizada

M1 a M4: Mezcla de concreto elaborada con agregados finos y gruesos de peso normal con un tamaño máximo de partícula (tamaño máximo de agregado) de 2.52 y 0.2 cm , cemento Portland ordinario (CPO 40) y aditivo tipo Glenium 3200.

M5 a M8: Mezcla de mortero elaborada con cemento portland ordinario (CPO 40), agregado fino con un tamaño máximo de partícula (tamaño máximo de agregado) de 0.2 cm y aditivo tipo glenium 3200.

Para la fabricación de los especímenes de concreto y mortero se siguió el siguiente procedimiento:

1. Fue seleccionado el proporcionamiento en base a las especificaciones que sugiere el American Concrete Institute (ACI).
2. El material necesario fue seleccionado y pesado: agua, cemento CPO 40, agregado fino y grueso.
3. Antes de vaciar el concreto y el mortero, los moldes fueron engrasados para tener una mayor facilidad al desmoldarlos (Ver figura 24)
4. Para el mezclado se utilizó una revolvedora eléctrica con capacidad de 80 litros (Ver figura 24) para posteriormente iniciar el mezclado con tiempos establecidos como sugiere el American Concrete Institute (ACI). Para un concreto de composición uniforme y con una resistencia adecuada, es primordial conocer el tiempo mínimo de mezclado. El tiempo varía según el tamaño de la mezcladora,

el número de revoluciones de la mezcladora es el factor determinante para asegurar un mezclado adecuado. Por lo general, 20 revoluciones por minuto es lo adecuado.

4.1 Previo a iniciar la rotación de la mezcladora, se añadió el agregado grueso y algo de agua, después se encendió la mezcladora y se añadió el agregado fino, el cemento y el parte del agua con la mezcladora en funcionamiento.

4.2 Después de colocar todos los componentes de las mezclas, se contabilizaron 3 minutos de mezclado para después continuar con un periodo de reposo de 3 minutos. Al finalizar se cubrió la mezcladora con un plástico para evitar la evaporación durante el periodo de reposo.

5. La colocación del concreto y mortero se realizó en moldes de madera con las siguientes dimensiones: 10 x 10 x 30 cm, 15 x 15 x 50 cm, 15 x 15 x 60 cm, 15 x 10 x 50 cm, 15 x 10 x 30 cm, 15 x 10 x 60 cm, 15 cm x 10 cm x 50 cm y 10 cm x 10 cm x 40 cm. Posteriormente se procedió a vaciar las mezclas en los moldes, utilizando la técnica de capas que consiste en dividir en tres capas la cantidad final de mezcla para la correcta compactación dentro del molde. Esta técnica consiste en golpear un determinado número de veces entre cada capa con una varilla graduada con punta semi-elíptica. Al finalizar, los moldes con mezcla fueron colocados en una mesa de vibración para obtener una mejor compactación.

6. Transcurrido 24 horas del llenado de los moldes, se procedió al desmolde y colocación en un cuarto de curado a una humedad relativa del 100 % por un periodo de 28 días. ^[64]



Figura 24. Resumen de elaboracion de mezclas.

- a) Moldes de maderas; b) Moldes engrasados; c) Mezcla de concreto; d) Compactación de mezcla de concreto en moldes; e) Curado de moldes de concreto; f) desmolde de probeta de concreto y mortero.

5.7 Pruebas en estado fresco

Para asegurar una buena calidad en un concreto es necesario realizar pruebas de estado fresco en las mezclas elaboradas. Las pruebas que se realizaron al concreto elaborado en esta investigación fueron: medición de temperatura del concreto recién mezclado, revenimiento en el concreto y determinación de la masa unitaria en concreto.

a) *Medición de temperatura en concreto fresco:* Su función fue de verificar el cumplimiento de los requisitos especificados con anterioridad. La temperatura del concreto depende del aporte calorífico de cada uno de sus componentes, además de calor liberado por la hidratación del cemento, la energía de mezclado y el medio ambiente.



Figura 25. Medición de temperatura.

Con base en las especificaciones de la norma ASTM C 1064, se obtuvo una muestra representativa de los 50 litros de concreto dentro de un contenedor no absorbente con capacidad de otorgar una mínimo de 3 pulgadas (75 mm) de concreto alrededor del sensor de temperatura en cualquier dirección. Después se utilizó un termómetro con una exactitud de $\pm 1^\circ \text{F}$ ($\pm 0.5^\circ \text{C}$), con un intervalo de temperatura de 30°F a 120°F (0° a 50°C) y se colocó dentro de la muestra representativa de concreto donde el sensor del termómetro se cubrió un mínimo de 3 pulg (75 mm). Al finalizar un lapso de espera de dos minutos o la estabilización de la lectura se procedió a tomar la lectura. ^[65]

b) *Medición del revenimiento de concreto en estado fresco:* Su objetivo es determinar la consistencia del concreto a través de una medida de la fluidez o movilidad relativa de la mezcla de concreto. El proceso se basa en la norma ASTM C 143; 1): se humedeció el interior del cono de revenimiento para después colocar el cono en una superficie plana, húmeda y no absorbente, se sostuvo el cono firmemente apoyándose en los estribos de a cada lado del molde. ^[66]

2) Se procedió a llenar el cono en tres capas, la primera fue de aproximadamente de 1/3 de su volumen, la segunda fue de 2/3 de su volumen y la tercer capa hasta la parte superior del cono. Cada capa se varilló 25 veces en todo su espesor con una distribución uniforme sobre la sección transversal de cada capa. Al finalizar el llenado del cono, se enrasó la parte superior con una varilla de compactación con un movimiento de enrasado. 3) Se removió el concreto que se acumuló alrededor de la base del cono durante el enrasado y después se removió inmediatamente el cono en una dirección vertical. 4) Por último se midió el revenimiento que consistió la distancia vertical entre la parte superior del cono y la altura del espécimen del concreto. El resultado del peso volumétrico se obtuvo mediante la siguiente formula:

$$PV = P \text{ material} / V_{\text{tara}}$$

Datos: Peso tara = 3.95 Kg, Peso concreto = 8.92 Kg Peso tara + concreto = 12.47 kg
Volumen tara = 3915.75 cm³ → PV = 2175.85 kg/m³



Figura 26. Medición del revenimiento de concreto.

c) *Medición de masa unitaria:* Por medio de la norma ASTM C 138, se realizó la determinación del peso ó masa unitaria del concreto en estado fresco. 1) Se determinó el peso del recipiente vacío (kg) que se utilizó, se llenó el recipiente en tres capas de aproximadamente un mismo volumen (1/3 del volumen por capa) y se varilló 25 veces en todo el espesor sin golpear el fondo del recipiente, se golpeó ligeramente el exterior del recipiente de 10 a 15 veces con un martillo de goma con el fin de cerrar los huecos dejados por la varilla de compactación. 2) Se enrasó la parte superior de la superficie del concreto para después limpiar correctamente el exterior del recipiente. Por último se calculó la densidad (masa unitaria) del concreto en el recipiente, restando el peso del recipiente vacío y dividiendo entre el volumen del recipiente, teniendo como resultado la masa unitaria expresada en Kg/m³. [67]



Figura 27. Medición de masa unitaria

5.8 Pruebas fisicoquímicas y mecánicas

5.8.1 Ensayo a flexión

Como un indicador de la calidad del concreto o mortero, la resistencia a flexión nos ofrece un panorama de la relación de distintos materiales así como sustituciones de agregados o algún aditivo.

El ensayo a flexión se llevó a cabo en una máquina Instron LX series. Los especímenes de concreto y mortero fueron sometidos a ensayos de flexión a 4 puntos (ver figura 28), o sea, la zona central de la viga de concreto o mortero estuvo sometida a una tensión uniforme y el momento flector en la parte central fue constante. [68]

Con estos ensayos se podrá evaluar el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia a la flexión del material (vigas de concreto y mortero).

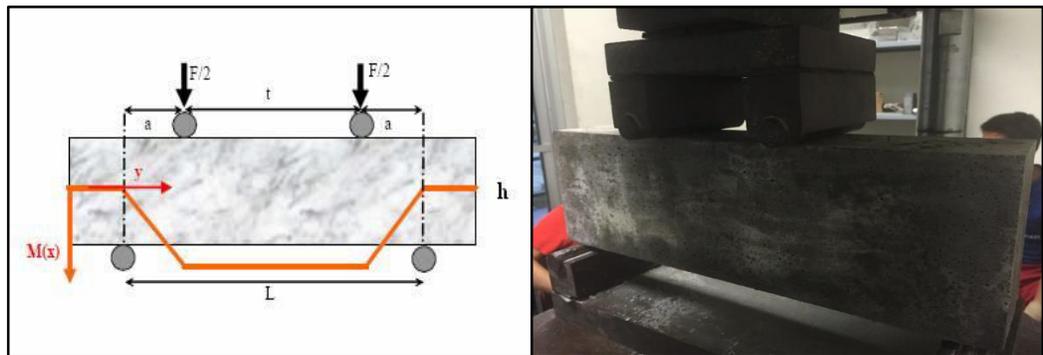


Figura 28. Ensayo a Flexión.

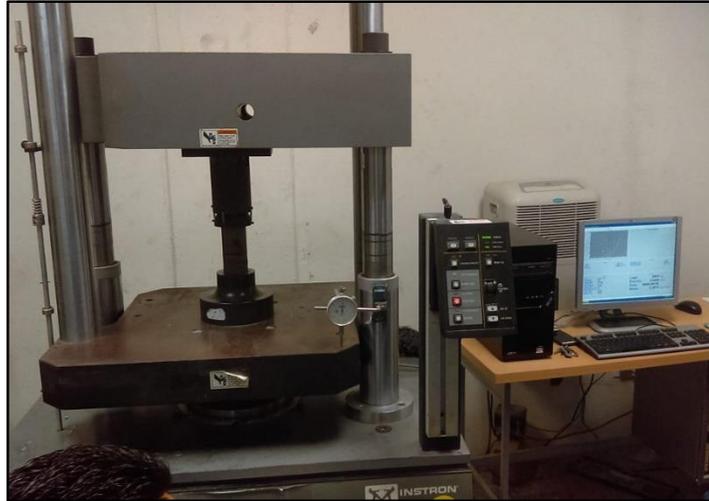


Figura 29. Maquina Instron LX series.

5.8.2 Difracción de Rayos X (DRX)

Para la caracterización del cemento, la difracción de rayos X (FRX o XRF), es una técnica estándar en la industria del cemento, se utiliza para determinar las concentraciones de óxido de metal-óxido, también nos proporciona un análisis cuantitativo.

De esta manera podemos identificar lo diferentes compuestos formados en el proceso de fraguado y tener un panorama claro desde el inicio hasta el final de la realización de las mezclas.

Antes de realizar en análisis las vigas de concreto y mortero fueron cortadas en delgadas tabletas, para después con un cortados con disco de diamante, cortar las muestras a una medida más pequeña.



Figura 30. Cortadora con disco de diamante.

5.8.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Con el propósito de conocer la morfología de los materiales, se empleó la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM). El análisis morfológico fue realizado en un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío JEOL SM-6490LV, equipado con un detector EDS ICA-X Sighting Instruments de Oxford.

5.9 Topometría

Los datos topométricos de las superficies analizadas fueron obtenidos con distintos equipos de medición que a continuación se detallan. La resolución con la que cuentan los equipos en las direcciones (x, y, z) es de 2 de 2 μm ,2 μm y 5 μm , el escáner óptico cuenta desde de 0.002 mm, 0.02 mm, 0.02 mm y la máquina de coordenadas alcanza hasta 0.2 μm .

5.9.2 Analisis de escalamiento

Al finalizar los análisis topométricos en forma electrónica se continuó con el análisis de autoafinidad. Los datos obtenidos en el software de los escáneres fueron convertidos a coordenadas (x, y, z).



Figura 31. Diagrama que indica la dirección en que fueron realizados los barridos para las vigas de concreto y mortero.

CAPÍTULO

VI

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la caracterización y evaluación de las especímenes de concreto y mortero.

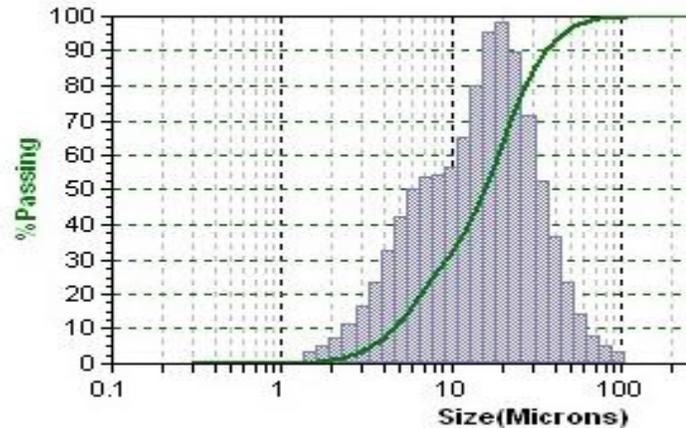


Figura 32. Distribución de tamaño de partícula del cemento.

6.1 Distribución de tamaño de partícula

En la figura 32, se muestra el promedio del tamaño de las partículas del cemento que fue utilizado en la elaboración de las mezclas y rondan en un tamaño menor a los de los 45 micrómetros con un promedio de partículas de 15 micrómetros.

6.2 Concreto en estado fresco

6.2.1 Temperatura

En esta prueba se registró la hora de inicio de cada mezcla, así como la temperatura ambiente a la hora del mezclado y la temperatura del concreto en estado fresco.

TABLA IV

MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN MEZCLA DE CONCRETO

Tipo de mezcla	Hora de inicio	Temperatura ambiente	Temperatura de la mezcla
Concreto	11:40 am	22° C	21°C

6.2.2 Revenimiento y peso volumétrico

Se obtuvieron valores cercanos al revenimiento deseado en el proporcionamiento que se diseñó, ya que al evaluar su consistencia, nos permitió medir que tan aguda es la mezcla, si ésta consistencia es aceptable. Según el American Concrete Institute un revenimiento normal en concreto tipo estructural puede variar de 6 a 10 cm.

TABLA V

MEDICIÓN DEL REVENIMIENTO EN MEZCLA DE CONCRETO

Tipo de mezcla	Revenimiento de diseño	Revenimiento obtenido
Concreto	10 cm	9 cm

TABLA VI

MEDICIÓN DEL REVENIMIENTO EN MEZCLA DE CONCRETO

Tipo de mezcla	Peso volumétrico (Kg/m ³)
Concreto	2175.85

6.3 Ensayos mecánicos

En la tabla VII se muestran los resultados obtenidos de las barras de concreto y mortero que fueron ensayadas a flexión.

TABLA VII
CARACTERISTICAS Y RESULTADOS A COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO

Probetas de Concreto			
Probeta	Relación a/c	Dimensiones (cm)	Resistencia (Mpa)
1	0.5	10x10x30	10.17
2		15x15x50	17.19
3		15x15x60	19.71
4		15x10x50	12.97
Probetas de Mortero			
5	0.4	10x10x30	13.48
6		15x10x60	17.07
7		15x10x50	16.96
8		10x10x40	9.223

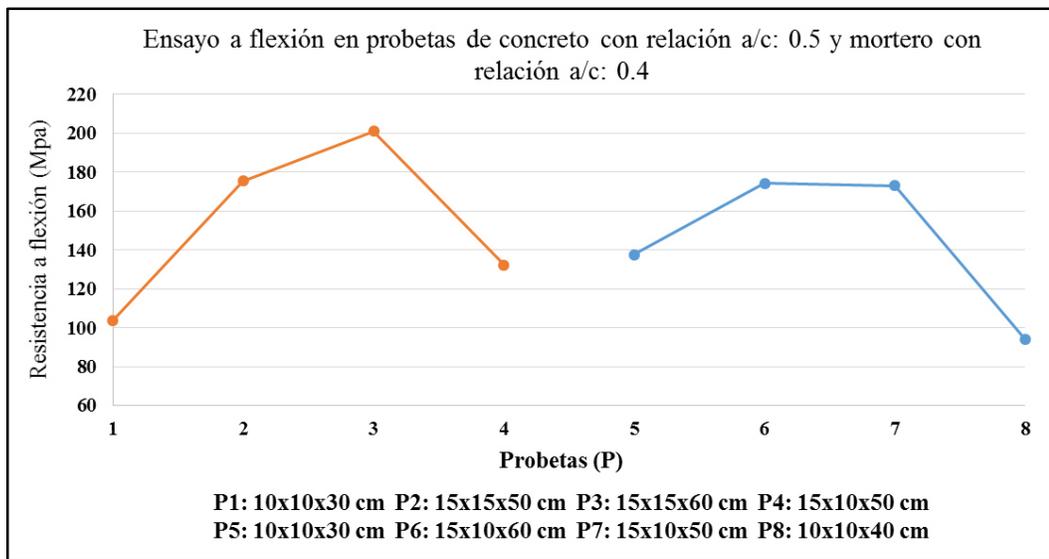


Figura 33. Resultado de los ensayos a flexión para las probetas de concreto y mortero.

La resistencia a la flexión en un concreto o mortero es baja en comparación con su resistencia a compresión, pero muy superior a su resistencia a tracción pura. Como la resistencia a flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto o mortero, es posible observar que el módulo de ruptura varía con respecto a la dimensión de la viga,

entre mayor es la dimensión mayor es la resistencia a flexión, también es posible determinar que el módulo de ruptura varia con respecto a la relación agua/cemento.

6.4 Caracterización microestructural

6.4.1 Microscopía óptica

Una vez fracturadas las probetas de concreto y mortero, utilizando una sierra mecánica se realizaron cortes rectangulares con la finalidad de realizar la caracterización microestructural de las muestras. Después esas piezas fueron cortadas en dimensiones de 1 in X 1 in X 1 in para su posterior análisis en el SEM.

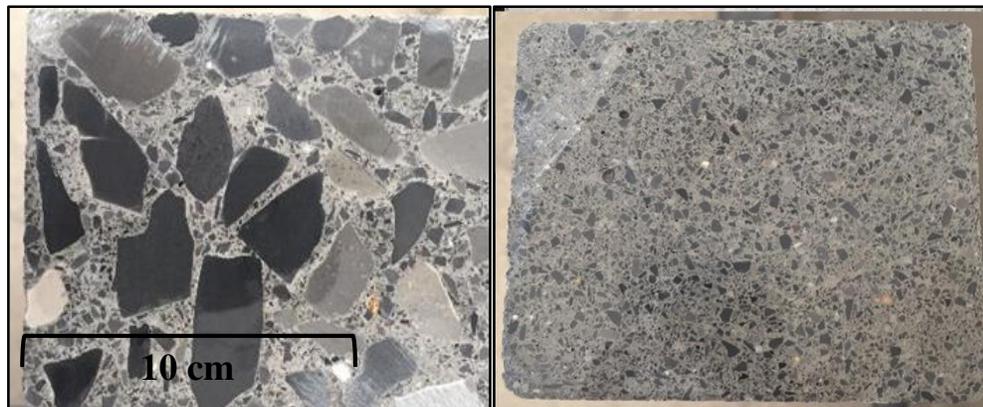


Figura 34. Cortes de probetas de concreto y mortero.

En las figuras 35 y 36 se muestran imágenes de la microestructura de las muestras pulidas y observadas en el microscopio electrónico de barrido con ampliificaciones de 25 y 50 X de aumento, también se aprecia que la morfología es irregular así como los tamaños de los agregados.

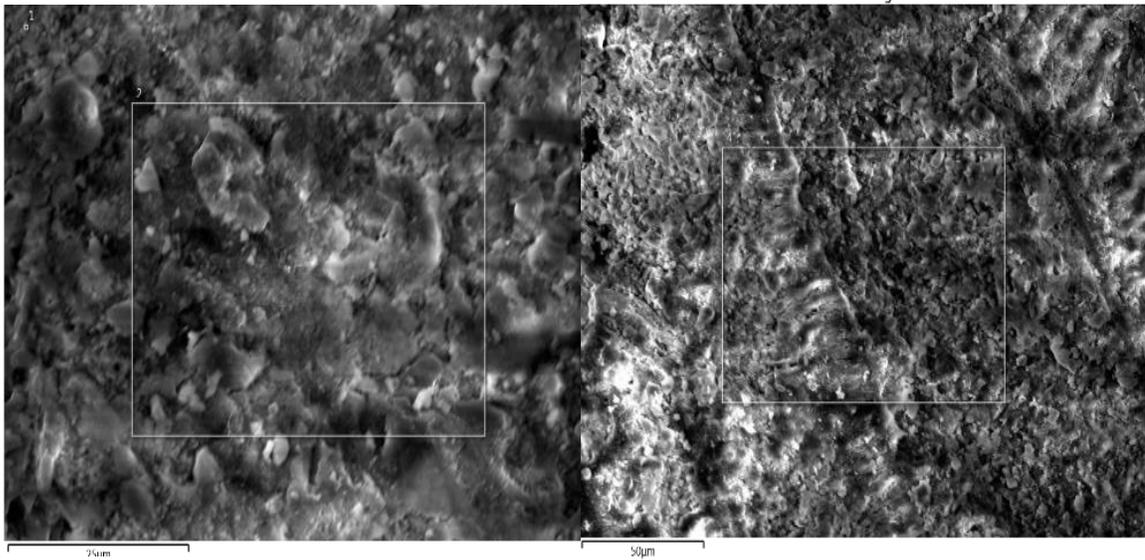


Figura 35. Muestra de concreto observadas en SEM

En la figura 35 y 36 es posible apreciar más minuciosamente el proceso de fractura en el concreto y mortero. Teniendo en cuenta que las imágenes fueron tomadas en el microscopio electrónico de barrido se puede observar la dirección de las microgrietas que fueron generadas por flexión en probetas a 4 puntos. Es más notorio observar la presencia de contracción por secado en la muestra de concreto ya que al exponerse al medio ambiente la muestra pierde agua por evaporación, así como una morfología y topografía irregular con cristales de distintos tamaños producto del curado de las probetas. Con un aumento más detallado es posible apreciar las distintas morfologías y fases de los cristales y estructuras del concreto (Carbonatos y Etringita).

En la figura 36, resalta la forma de distribución de las partículas a nivel superficie de la muestra, hay zonas en que no se fijan o se han desprendido las partículas que corresponden a límites de grano de la muestra.

Dentro del análisis de las muestras analizadas en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), están presentes dos razones importantes que hacen una diferencia muy notoria, la primera es que el concreto fue elaborado con una relación agua/cemento de 0.5 y el mortero con una relación agua/cemento de 0.4 , lo que hace que la segunda sea más densa, homogénea y más compacta que la de una relación agua/cemento de 0.5, además de tener una porosidad menor debido a que un aumento de la relación a/c ocasiona una disminución de la compacidad y en consecuencia de la resistencia química del concreto o mortero.

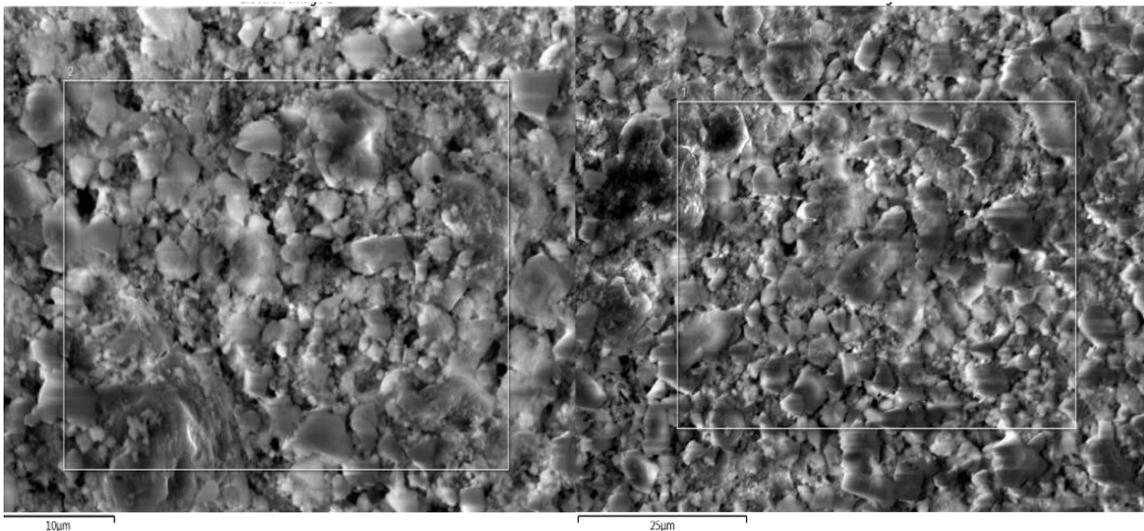


Figura 36. Muestras de Mortero observadas en SEM

6.5 Estudio de superficies de fractura

Para caracterizar las superficies rugosas de las probetas se implementó el uso de un láser para obtener la topometría. Con este método de reconstrucción tridimensional proporciono una representación topográfica de cada superficie de fractura de las probetas analizadas, (Ver figura 37, 38, 39 y 40). Las siguientes figuras fueron generadas por la energía mecánica liberada en cada probeta, este proceso de disipación ocurrió dentro de la grieta,

pues como cualquier material elástico, el inicio de una grieta ocurre cuando la energía liberada es suficiente para generar un equilibrio y generar una nueva superficie tal y como ocurre en las probetas y se muestran en las imágenes (Ver figura 37, 38, 39 y 40).^[69] Un ejemplo de ello, es que en zonas más oscuras corresponden a superficies más bajas y las de color claro a superficies con mayor altitud de su relieve.

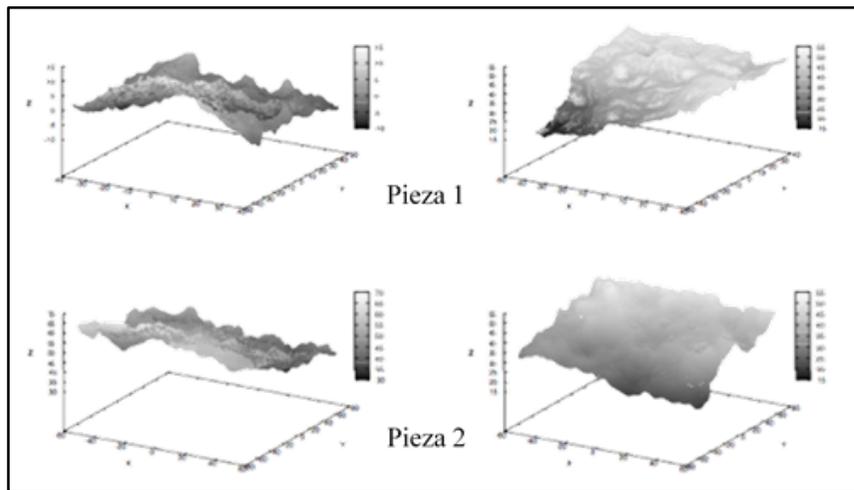


Figura 37. Mapa de elevación de probetas uno y dos.

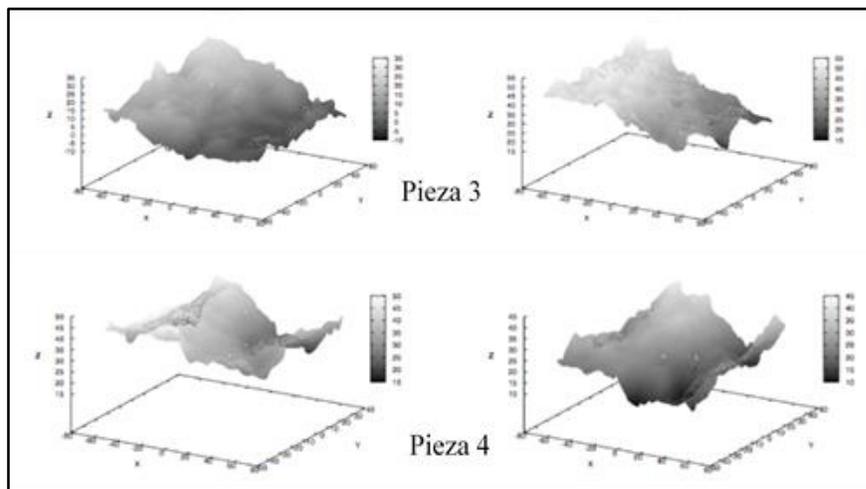


Figura 38. Mapa de elevación de probetas tres y cuatro.

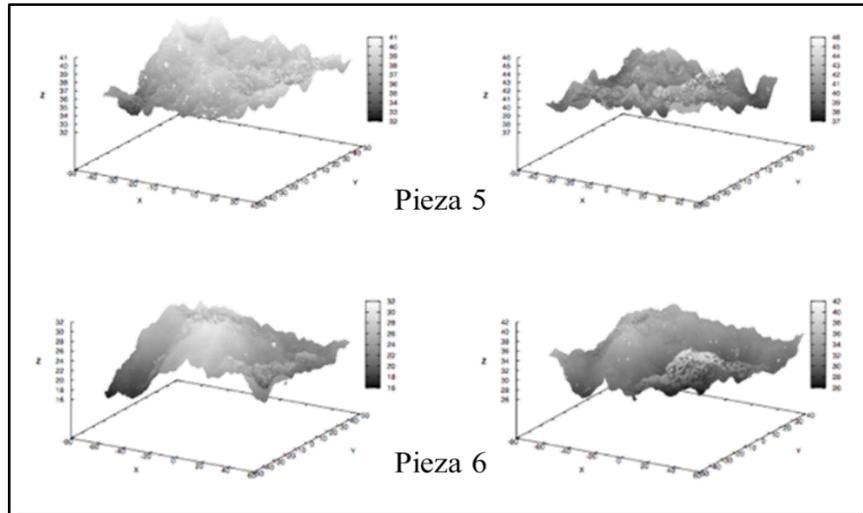


Figura 39. Mapa de elevación de probetas cinco y seis

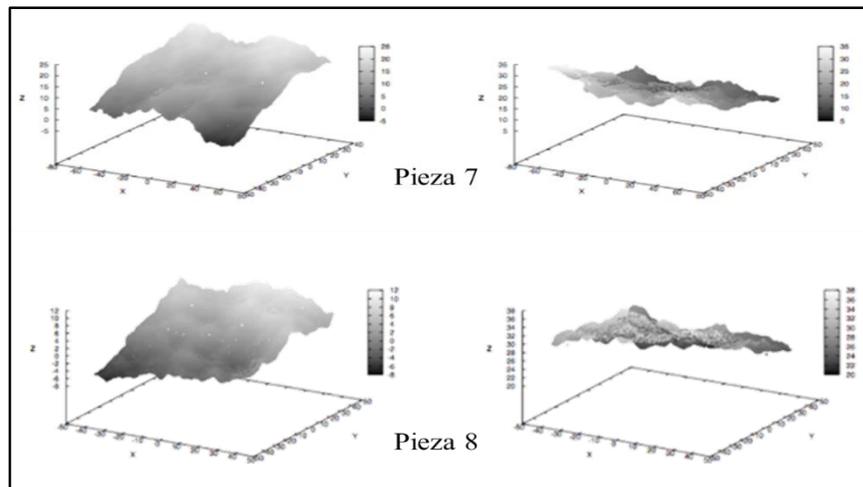


Figura 40. Mapa de elevación de probetas siete y ocho.

En la tabla VIII se muestran la relación del exponente de hurst para el concreto y mortero. Los resultados obtenidos del exponente de hurst están directamente relacionados con la dimensión fractal. La dimensión fractal nos proporciona una indicación de cuán tan áspera es una superficie, para las superficies de fracturas que se generaron nos muestra una dimensión fractal baja y una superficie lisa.

TABLA VIII

RELACIÓN DE RESULTADOS DEL EXPONENTE DE HURST EN EJES X, Y

Pieza	X Resolution		X Hurst exp	Y Resolution		Y Hurst exp	
Concreto							
1-1	8417.120	573.42	0.9341	8072.10	626.48	0.9713	0.0172
1-2	480.370	69.920	0.9090	470.19	68.10	0.9064	0.0760
2-1	3595.420	330.405	0.8901	3491.63	270.55	0.958	0.017
2-2	4027.550	458.485	0.8904	3885.36	381.47	0.9554	0.022
3-1	4227.790	318.813	0.9516	4281.41	380.55	0.860	0.054
3-2	3678.480	265.236	0.9501	3707.53	258.53	0.871	0.048
4-1	2146.430	273.117	0.929	3153.08	255.75	0.955	0.019
4-2	2154.12	204.174	0.925	3226.97	214.66	0.959	0.016
Mortero							
5-1	1827.96	69.778	0.955	1817.71	142.77	0.944	0.017
5-2	2059.06	87.755	0.954	2055.56	181.22	0.944	0.016
6-1	1771.25	137.045	0.933	2631.69	65.05	0.946	0.022
6-2	1968.86	125.67	0.933	2916.33	201.97	0.950	0.016
7-1	2168.21	162.477	0.789	3291.83	168.66	0.957	0.015
7-2	1464.26	149.586	0.773	2245.28	201.92	0.959	0.011
8-1	2198.48	155.77	0.853	2238.36	53.285	0.942	0.031
8-2	1879.08	181.56	0.846	1907.40	178.08	0.941	0.023

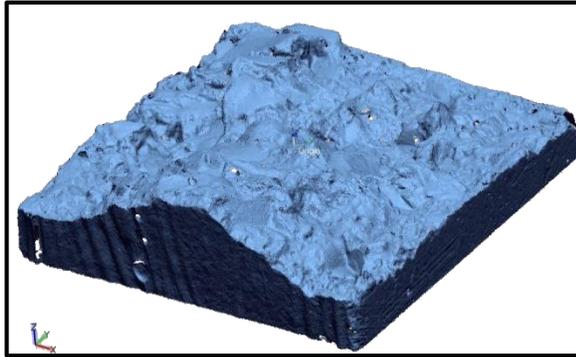


Figura 41. Ilustración en 3D de la pieza 1-1.

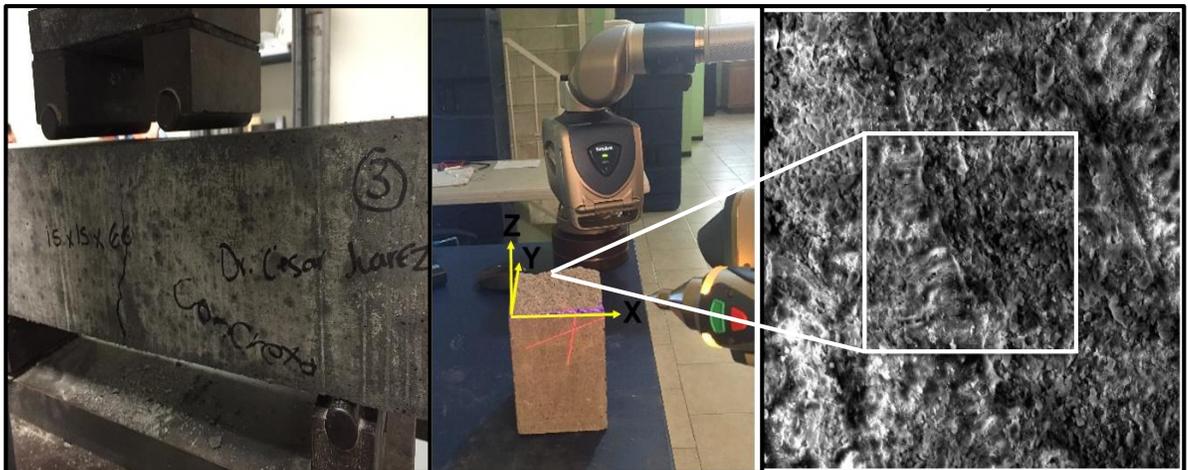


Figura 42. Relación de la propagación de fisuras en probeta 3.

La microestructura de las probetas del concreto y del mortero fue altamente heterogénea y con cambios posteriores debidos al curado. La cantidad de poros presentes en la matriz de cemento tiene una repercusión importante en las propiedades mecánicas de las probetas de concreto y mortero ya que estos funcionan a modo de concentradores de esfuerzos y se pueden nuclear grietas alrededor de ellos. En las figura 42 se observa que la fractura es mixta pues se presenta una fractura transgranular por medio de las fronteras del grano, es

decir, que presentó desprendimiento de agregados. En cambio en la figura 41 los agregados tienen una fractura semejante a la que presentan los materiales vitreos, identificando dos posibles zonas, una relativamente lisa o plana y otra con una alta rugosidad (fibrosa) (Ver figura 43) .^[1]

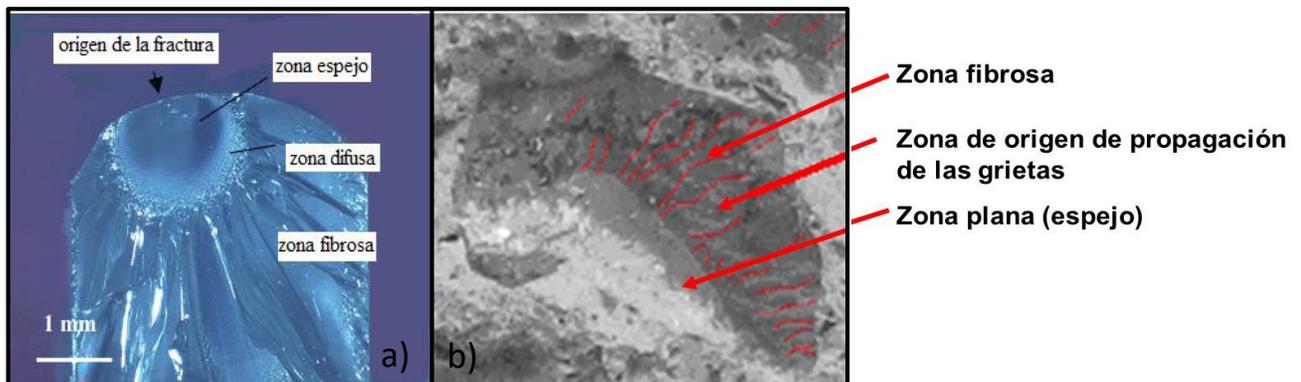


Figura 43. Relación de fractura en probeta de vidrio vs probeta de concreto. a) Fractura en probeta de vidrio. b) Imagen de agregado fracturado por ensayo a flexión en probeta de concreto con una relación agua/cemento de 0.5.

En la mayoría de las probetas se pudo identificar el origen de las principales grietas que provocaron la falla del material.

Del análisis de las superficies de fractura del concreto y mortero, la longitud y la anchura de la zona del proceso son cruciales para seleccionar la geometría y las dimensiones de las muestras. Alrededor de las grietas principales se presentaron microfisuras muy cerradas, por lo tanto es importante observar la fractura interna del concreto.

Las microseparaciones de las probetas se nuclearon principalmente a partir de partículas grandes que están presentes, cuando esto ocurrió la pérdida de capacidad de carga de estas partículas cambió de carga a las partículas más pequeñas, dando lugar a micro-

separaciones secundarias. De esta manera, las partículas más pequeñas dieron lugar a la coalescencia.

CAPÍTULO

V

CONCLUSIONES

Conclusiones

Con base a los objetivos que se planteados y los resultados obtenidos en la presente investigación de tesis se establecen las siguientes conclusiones:

1. Las superficies de fracturas que fueron generadas en probetas de concreto y mortero se exhibió un comportamiento autofin y un comportamiento anómalo.
2. El tipo de fractura que se presentó en los especímenes de concreto y mortero fue del tipo mixto, ya que el tipo de fractura es similar a los que se presentan en materiales vítreos.
3. Se obtuvo un mayor exponente de Hurst en las probetas de concreto y mortero (0.9516 y 0.955), por lo que se obtuvo una dimensión fractal más baja y una superficie más lisa.
4. La relación agua/cemento en las mezclas de concreto y mortero provoco un tamaño de poros de apariencia circular de 5 μm hasta 100 μm , por lo que sugiere que hubo inclusión de aire durante el mezclado. Esta presencia de poros están presentes en la matriz cementante y tuvo una repercusión en las propiedades mecánicas de los especímenes analizados ya que estos funcionan a modo de concentradores de esfuerzos y originaron nucleación de grietas alrededor de ellos.
5. El análisis de superficies de fractura permitió encontrar la relación que existe entre la influencia de los elementos particulados sobre el escalamiento autofin de las superficies de fractura en materiales particulados como el concreto y mortero.

Referencias bibliográficas

1. Hull D., Fractography, Cambridge University Press 1999
2. Fernández-Baqueiro, L.E. , Pérez, H.A. ,Varela, J. L., (2006), “Characterizacion of fracture parameters of plain concrete by a numerical analysis”, Journal of Ingeniring, pp 23-34.
3. Fabián Augusto Lamus Báez, Sergio Mauricio Segura Arenas, (2013), “ Energía de fractura en modo II del concreto de resistencia normal reforzado con fibras cortas de acero”, Épsilon, págs 159-171.
4. Barenblat, G. I., (1962), “The mathematical theory of equilibrium crack in brittle fracture”, Advance Applied Mechanics, págs 55-129.
5. Kumar Shailendra y Bari Sudhirkumar V, (2011), “Concrete fracture models and applications”, Springer ;págs 9-11.
6. Griffith, A.A., (1920), “ The phenomena of rupture and flow in solids. London : Royal Society of London”, pp. 163-198.
7. G.R. Irwin, J.A. Kies and H.L Smith, (1958), “ Fracture in Encyclopedia of Physics” vol. VI, Springer, Berlin, Am. Soc. Test. Matter. Proc, pp. 640-660.
8. Referencia tomada del libro Fracture Mechanics: Fundamentals and Aplications. Ted L. Anderson.
9. James F. Shacklerlford, (1998), “Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros” cuarta edición. Ed. Prentice Hall.
10. Referencia tomada del libro: Concrete, Microstructure, Properties and Materisl. Mehta, P., Monteiro, P.J.
11. Fracture models for concrete and other cementisious materials, Centre for Integrated Design of Advanced Structures
12. Bazant, Z. P. & Planas, J. (1998) ,“Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials (CRC Press, Boca Raton, FL).
13. Committee A C I Fracture Mechanics. Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determination of Material Properties.; 1999.
14. Mehta, P., & Monteiro, P. J. (n.d.). Concrete, Microestructure, Properties and

Materials. Concrete (R.).

15. Victor E. Saouma, Lecture notes in fracture mechanics.
16. Wiederhorn, S.M. Brittle, (1984), “ fracture and toughening mechanisms in ceramics”, Florida : University Of Florida - Smathers Library
17. Committee, ASM Handbook. ASM Handbook Volume 12 Fractography. 1987. 9th Edition of Metals Handbook.
18. Hull, Derek., (1999), “Fractography, Observing, Measuring and interpreting fracture surface topography United Kingdom”: Cambridge University Press.
19. MJ Anglada, (2002): “Fractura de materiales”, Barcelona, España, Ediciones UPC.
20. Mandelbrot, B.B., (1982), “The Fractal Geometry of Nature”. New York, NY: W. H. Freeman and Company.
21. Talanquer, Vicente, Fractus, Fracta, Fractal. Fractales, de Laberintos y Espejos. Primera edición 1996, México, Fondo de Cultura Económica.
22. Carpinteri A, Lacidogna G, Pugno N., (2004), “Scaling of energy dissipation in crushing and fragmentation: a fractal and statistical analysis based on particle size distribution”, *International Journal of Fracture*; pp. 131-139.
23. B. B. Mandelbrot, Passoja D. E. and A. Paullay, (1984), “ Fractal character of fracture surfaces of metals”. *Nature* 30, pp. 721-722.
24. Bouchaud E., (2003), The morphology of fracture surfaces: “A tool for understanding crack propagation in complex materials”. *Surface Review and Letters*; pp. 797-814.
25. Schmittbuhl J, Vilotte J., (1994), “Reliability of Self-affine Measurements” . *Physical Review E*, pp 51.
26. Maurice Kleman and Oleg Lavrentovich; Soft matter physics; An introduction.
27. Morel S, Schmittbuhl J, Lopez J, Valentin G., (1998), “ Anomalous roughening of wood fractured surfaces” . *Physical Review E*. 58(6): pp 6999-7005.
28. Sauma V, Barton C, Gamaleldins N, (1990), “ Fractal Characterization of Fracture Surfaces in Concrete” . *Engineering Fracture Mechanics*,: pp 47-53.
29. Brandt AM, Prokopski G, (1993),” On the Fractal Dimension of Fracture Surfaces of Concrete Elements”. *Journal of Material Science*, pp 4762-4766.
30. Carpinteri A, Cornetti P., (1994), “ A Multiscale Approach to Concrete Fracture” ,

The influence of the Aggregate Grading, pp 1-12.

31. Carpinteri A, Chiaia B, (1995), “ Multifractal Nature of Concrete Fracture Surfaces and Size effects on Nominal Fracture Energy”, *Materials and Structures*, pp 435-443.
32. Bazant Z., (1997), “ Scaling of Quasibrittle Fracture: Hypotheses of Invasive and Lacunar Fractality ” , Their Critique and Weibull Connection. *International Journal of Fracture*, pp 41-65.
33. Morel S, Schmittbuhl J, Lopez J, Valentin G., (1998), “ Anomalous roughening of wood fractured surfaces”, *Physical Review E*, pp 6999-7005.
34. Hinojosa M, Bouchaud E, Nghiem B., (2000), “ Rugosidad a Larga Distancia en Superficies de Fractura de Materiales Heterogéneos”, *Ingenierías*; 539(7): pp 16-21
35. Mechtcherine V., (2000), “Fracture mechanical behavior of concrete ad the condition of the fracture surfaces on different scales”, pp 0-5.
36. Prokopski G, Langier B., (2000), “Effect of Water/Cement Ratio and Silica fume Addition on the Fracture Toughness and Morphology of Fractured Surfaces of Gravel Concretes” , *Cement and Concrete Research*, Vol 30, págs. 1427-1433.
37. Czarnecki L, Garbacz A, Kurach J., (2001), “On the characterization of polymer concrete fracture surface” . *Cement and Concrete Composites*, Vol 23, pp. 399-409.
38. Dougan LT, Addison PS., (2001), “ Estimating the cut-off in the fractal scaling of fractured concrete ”. *Cement and Concrete Research*, Vol 31, pp. 1043-1048.
39. Zhang Z, Yu J, Kou S, Lindqvist P, (2001), “ On Study of Influences of Loading Rate on Fractal Dimensions of Fracture Surfaces in Gabbro”. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol 34, pp. 235-242.
40. Morel S, Bouchaud E, Schmittbuhl J, Valentin G. R, (2002), “Curve behavior and roughness development of fracture surfaces”. *International Journal of Fracture.*, Vol 114, pp. 307-325.
41. Hinojosa M, Aldaco J, Reyes-Melo E., (2002), “Fractometría y propagación autoafín de grietas en materiales heterogéneos”, *Ciencia UANL*, Vol 1, pp 66-71.
42. Babadagli T, Develi K., (2003), “ Fractal characteristics of rocks fractured under

- tension”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol 39, pp 73-88.
43. Yan A, Wu K, Zhang D, Yao W., (2003), “ Influence of concrete composition on the characterization of fracture surface”, *Cement and Concrete Composites*, Vol 25, pp. 153-157.
 44. C.S. Velasco Aguilar, F. Casanova del Angel.,(2004), “ Estudio de las estructuras con fractales en elementos de concreto reforzado”, *El portulano de la ciencia*, Vol 12, pp. 421-434.
 45. Mourot G, Morel S, Bouchaud E, Valentin G., (2005), “Anomalous scaling of mortar fracture surfaces”. *Phys. Rev. E.*, pp. 71.
 46. Carpinteri A, Puzzi S., (2005), “The crack surface anomalous scaling and its connection with the size-scale effects” , *International Journal of Fracture*, Vol 133, pp. 43-60.
 47. Ponson L, Bonamy D, Auradou H, et al., (2006), “ Anisotropic self-affine properties of experimental fracture surfaces”, *International Journal of Fracture*. Vol 8, pp 27-37.
 48. Ponson L, Auradou H, Pessel M, Lazarus V, Hulin JP., (2007), “ Failure mechanisms and surface roughness statistics of fractured Fontainebleau sandstone “ . *Physical Review Letters*, Vol 76, pp. 1-7.
 49. Morel S, Bonamy D, Ponson L, Bouchaud E. (2008), “Transient damage spreading and anomalous scaling in mortar crack surfaces” . *Physical Review E*, Vol 78, pp 1-5.
 50. Hinojosa M, Reyes-Melo E, Guerra C, González V, Ortiz U. Scaling properties of slow fracture in glass: from deterministic to irregular topography. *Int. J. Frac.* 2008; 151:81-93.
 51. Mechtcherine V., (2009), “ Fracture mechanical behavior of concrete and the condition of its fracture surface”. *Cement and Concrete Research*, Vol 39, pp 620-628.
 52. Y.Dong, S. Wu, S.S. Xu, Y. Zhang, S. Fang., (2009), “Fracture of concrete structure using simplified meshless method. *Cement and Concrete Research*, Vol 39, pp 966-972.
 53. Kyoungsoo Park, Glaucio H. Paulino, Jeffery Roesler., (2010), “ Cohesive fracture

- model for functionally graded fiber reinforced concrete”. *Cement and Concrete Research*, Vol 40, pp 956-965.
54. Varela Alberto, Hinojosa Moises, (2010), "Exponentes locales y globales de escalamiento en superficies de fractura de un composito granulado". Maestria. Facultad de Ingenieria Mecanica y Electrica (UANL).
 55. Steven Werner, Karl-Christian Thienel, Andrea Kustermann, (2012), “ Study of fractured of concrete caused by projectile impact” . *International Journal of Impact*, pp. 52:23
 56. Wanzhen Wang, Xodong Qian, Baozhenh Yang., (2014), “ Fracture in concrete-filled square hollow section to H-section joints under low-cycle loading”. *Journal of Constructional Steel research*. Vol 101, pp 363-372.
 57. F. Rezaie, S.M. Farnam., (2015), “Fracture mechanics analysis of pre-stressed concrete sleepers via investing crack initiation length”, *Journal Engineering Failure Analysis*. Vol 58, pp. 267-280.
 58. Mohammad Karamloo, Moosa Mazloom, Gholamhasan Payganeh., (2016), “ Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lighthweight concrete. *Journal Construcción and Building Materials*”, Vol 123, pp. 508-515.
 59. Janusz Konkol, Grzegorz Prokopski, (2016), “ Fracture toughness and fracture surfaces morphology of metakaolinite-modified concrete”, *Journal Construcción and Building Materials*, Vol 123, pp. 638-648.
 60. M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez., (2016), “ Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete”: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fibre length and specimen size. *Journal Engineering Fracture Mechanics*, Vol 154, pp. 225-244.
 61. E. Bouchaud, G. Lapasset, J. Planès.,(1990), “Fractal dimension of fractured surfaces: a universal value” , *Europhysics Letters*. 1990, Vol 13, pp. 73.
 62. Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010: Industria de la construccion-cementantes hidraulicos-especificaciones y metodos de ensayo.
 63. Norma ASTM C188-16: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.

64. Norma ASTM C 192/C 192M – 00: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.
65. Norma ASTM C1064/C1064M-12: Método de Ensayo Normalizado de Temperatura de concreto de cemento hidráulico recién mezclado.
66. Norma ASTM C143/C143M-15^a: Standard Test Method for slump of hydraulic-cement concrete.
67. Norma ASTM C 138/C 138M-00: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.
68. Norma ASTM C 78-00: Standar Test Method for Flexural Strength of Concrete.
69. A, Griffith., (1920), “ The phenomena of rupture and flow in solids”. Trans R Soc Lond., pp- 163-221.