

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



**“ENERGÍA Y ESCALAMIENTO EN SUPERFICIES DE FRACTURA
DE ROCAS SINTÉTICAS Y NATURALES”**

PRESENTA

ING. MAURICIO GONZÁLEZ BANDALA

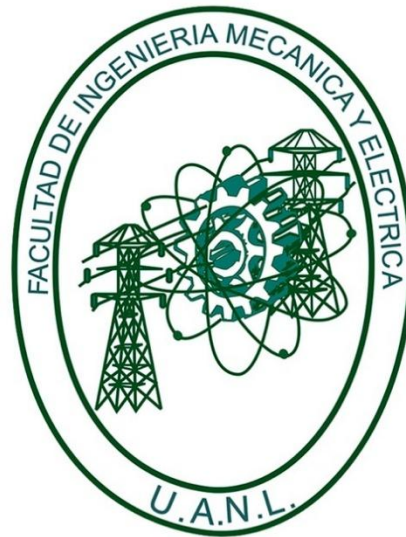
EN OPCIÓN AL GRADO DE:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L

FEBRERO 2026

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



**“ENERGÍA Y ESCALAMIENTO EN SUPERFICIES DE FRACTURA
DE ROCAS SINTÉTICAS Y NATURALES”**

PRESENTADA POR:

ING. MAURICIO GONZÁLEZ BANDALA

EN OPCIÓN AL GRADO DE:

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN
MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NL

FEBRERO, 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "**Energía y escalamiento en superficies de fractura de rocas sintéticas y naturales**", realizada por el estudiante Mauricio González Bandala, con número de matrícula 2125680, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Moises Hinojosa Rivera
Director

Dra. Ana María Guzmán Hernández
Revisor

Dra. Lauren Yolanda Gómez Zamorano
Revisor

Dr. José Abelardo Valdez Aguilar
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 557546

Acta Núm. 4610

Ciudad Universitaria, a 13 de febrero de 2026

Tabla de Contenido

Resumen.....	8
Abstract	9
Capítulo I: Introducción	10
Capítulo II: Marco teórico.....	13
2.1 Mineralogía y geología.....	13
2.1.1 Capas de la tierra / Corteza terrestre	13
2.1.2 Tipos de rocas.....	14
2.1.3 Composición mineralógica.....	15
2.2 Energía geotérmica.....	17
2.2.1 Enhanced geothermal systems (EGS)	17
2.2.2 Sismicidad en EGS.....	19
2.2.3 Medios de esfuerzo de suelos y rocas de yacimientos geotérmicos	20
2.3 Materiales granulados compositos como rocas sintéticas	22
2.4 Mecánica de fractura	23
2.4.1 Introducción	23
2.4.2 Tipos de fractura y tenacidad a la fractura	25
2.4.3 Módulo de Weibull.....	27
2.4.4 Zona de proceso de fractura	28
2.4.5 Efecto de tamaño	30
2.4.6 Energía de fractura – Método RILEM	31
Capítulo III: Estado del arte	35
Capítulo IV: Motivación, Hipótesis y Objetivo	48
Capítulo V: Metodología.....	51
5.1 Metodología	51
5.2 Material	52
5.3 Probetas	52
5.4 Ensayos de prueba materia prima.....	54
5.5 Ensayos mecánicos.....	55
5.6 Caracterización microestructural.....	58
5.6.1 Preparación de muestras para caracterización microestructural.....	59
5.6.2 Difracción de rayos X	59
Capítulo VI: Resultados y discusión	60

6.1 Pruebas mecánicas.....	60
6.1.1 Ensayo de compresión.....	60
6.1.2 Ensayo de tensión.....	61
6.1.3 Curvas carga - desplazamiento.....	62
6.1.4 Módulo de Weibull.....	66
6.1.5 Energía de fractura	67
6.1.5 Longitud característica	70
6.2 Análisis morfológico	72
6.2.1 Fractografía cualitativa.....	72
6.2.2 Microscopía óptica	74
6.2.3 Microscopía óptica de barrido	76
6.3 Composición química elemental	78
6.3.1 Microscopía electrónico de barrido – Espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS).....	78
6.3.1 Difracción de rayos X	81
Capítulo VII: Conclusiones.....	85
Referencias.....	88

Tabla de Figuras

Figura 1: Capas de la tierra (https://todamateria.com)	13
Figura 2: Ejemplos de tipos de rocas. (https://cienciasnaturales.es)	15
Figura 3: Diferentes alternativas para obtener energía geotérmica. [1]	18
Figura 4: Esquema básico de un EGS. [1].....	19
Figura 5: Esquema ingenieril de un sistema geotérmico mejorado. [8].....	20
Figura 6: Tareas mecánicas e ingenieriles en la roca caliente seca de un sistema geotérmico. [9]...	21
Figura 7: Definición de la coordenada del eje al inicio de la grieta. [15]	25
Figura 8: Los tres modos de carga que pueden iniciar una fractura. [15]	26
Figura 9: Ilustración de la zona de proceso de fractura [20]	29
Figura 10: Modelo esquemático de un sistema a flexión. [29].....	31
Figura 11: Curvas típicas de fracturas, (A) catastróficas, (B) Semi estables y (C) Estables [28]	32
Figura 12: Curva carga-deflexión típica, donde "a-b" se genera la fractura de manera catastrófica y "b-c" de manera controlada. [29]	32
Figura 13: Curva carga-desplazamiento controlada. [31]	33
Figura 14: Esquema estándar de viga de concreto. [30].....	34
Figura 15: Esquema estándar de viga de concreto, vista de frente. [30]	34
Figura 17: Esquema de metodología general propuesta.....	51
Figura 20: Se muestra el proceso de elaboración de probetas de concreto.	54
Figura 21: Cilindros para determinar resistencia a la compresión y módulo de elasticidad de las rocas sintéticas base cemento – agregado grueso.....	55
Figura 22: Diagrama del extensómetro, proporciona los datos necesarios para calcular el módulo de elasticidad del concreto.	56
Figura 23: Elaboración y ensayo de probetas base cemento – agregados finos y gruesos de acuerdo a la normativa.....	57
Figura 24: Elaboración de probetas y ensayos para roca sintética base cemento - agregado fino. ...	58
Figura 25: Resultado de ensayos a compresión para las rocas sintéticas, la línea negra con puntos triangulares son los resultados para rocas sintéticas base cemento - agregados finos, mientras que la línea roja con puntos cuadrados es para la roca sintética base cemento – agregados finos y gruesos.	60
Figura 26: Resultados de resistencia a la flexión para las rocas sintéticas, línea negra, roja y azul son rocas sintéticas C.AF mientras que la línea morada y verde son rocas sintéticas C.AFG.	62
Figura 27: Gráfica carga - desplazamiento de rocas sintéticas base cemento - agregado fino donde se observan las siguientes nomenclaturas MR para rocas sintéticas curadas por aspersion en un ambiente 100% de humedad, 0 R y R son rocas sintéticas curadas bajo inmersión en agua a 20° C.	63
Figura 28: Gráfica Carga – desplazamiento de rocas sintéticas base cemento – agregado fino y grueso, se observan las nomenclaturas R C y 0 R C, la cual R C son rocas sintéticas con dimensiones 15x15x50 cm, mientras que las rocas 0 R C poseen dimensiones 15x15x60 cm, es por ello por lo que la carga máxima disminuye considerablemente.....	64
Figura 29: Comparativa global de la gráfica carga desplazamiento para los tipos de rocas sintéticas, las rocas con nomenclatura MR, 0 R y R son del tipo C.AF (cemento - agregado fino) y las rocas con nomenclatura R C y 0 R C pertenecen al grupo C.AFG (cemento – agregado grueso).	65
Figura 30: Gráfica de probabilidad de falla acumulada en función al esfuerzo.	67

Figura 31: Fotografía de dos superficies de fractura en las rocas sintéticas tipo C.AFG, se utilizó este tipo de roca sintética debido a la facilidad con la que se puede apreciar los fenómenos de fractura.	72
Figura 32: Imagen de la superficie de fractura del concreto, se puede observar la dirección de la falla en las rocas sintéticas C.AFG. en color rojo, en color azul se puede observar el patrón tipo de una fractura frágil.....	73
Figura 33: Microscopia óptica x5 a) Roca sintética C.AF, b) Roca sintética C.AFG, c) Roca Natural expuesta a 100° C, d) Roca Natural a temperatura ambiente.	74
Figura 34: Microscopia óptica x100 a) Roca sintética C.AF curado en inmersión, b) Roca sintética C.AFG, c) Roca Natural expuesta a 100° C, d) Roca Natural a temperatura ambiente.	75
Figura 35: Microscopia electrónica de barrido x1.00k a) Roca sintética C.AF curado en inmersión, b) Roca sintética C.AFG, c) Roca Natural expuesta a 100° C, d) Roca Natural a temperatura ambiente.	76
Figura 36: Microscopia electrónica de barrido x15.00k a) Roca sintética C.AF curado en inmersión, b) Roca sintética C.AFG, c) Roca Natural expuesta a 100° C, d) Roca Natural a temperatura ambiente.	77
Figura 37: Microscopio electrónico de barrido - EDAX mapeo para la roca natural, se fracturó hidráulicamente a una temperatura de 100° C.....	78
Figura 38: Microscopía electrónica de barrido – EDAX mapeo de la roca natural, se fracturó hidráulicamente a una temperatura ambiente.....	79
Figura 39: Microscopio electrónico de barrido - EDAX de la roca sintética tipo C.AF	79
Figura 40: Microscopio electrónico de barrido - EDAX de la roca sintética tipo C.AFG	80
Figura 41: Microscopio electrónico de barrido - EDAX de la roca sintética tipo C.AF con curado por aspersion en ambiente controlado con 100% de humedad.	81
Figura 42: Difracción de rayos X para roca natural, fracturada hidráulicamente a 100° C de temperatura.....	81
Figura 43: Difracción de rayos X para roca natural, fracturada hidráulicamente a 100° C.....	82
Figura 44: Difractograma para roca sintética C.AF.	83
Figura 45: Difractograma de la roca sintética C.AFG.....	84

Resumen

Los esfuerzos encaminados a la mitigación de los efectos de cambio climático a escala global motivan al uso y optimización de las energías renovables, entre ellas se encuentra la energía geotérmica, la cual funciona gracias al aprovechamiento del calor del interior de la corteza terrestre en interacción con el agua subterránea. Este tipo de energía renovable ha atraído el interés de los investigadores debido a las dificultades que existen en torno a la optimización de los procesos de fractura para la construcción de los pozos geológicos, los problemas se centran en la fractura del material, concretamente en la energía requerida para llevar a cabo este proceso que permite incrementar la permeabilidad de las rocas ayudando así al paso del fluido y en este proyecto enfoca en el análisis de este fenómeno.

El objetivo de este proyecto es analizar rocas sintéticas (material base cemento – agregados pétreos) y rocas naturales extraídas de yacimientos geotérmicos con la finalidad de determinar una relación entre el número de componentes que posee el material, la energía de fractura y su estructura interna, de esta manera concluir si dicha relación puede influir en la optimización de los procesos de fractura.

Para llevar a cabo esta investigación, se elaboran rocas sintéticas base cemento – agregados pétreos, de igual forma se utilizan probetas de rocas naturales para: ensayos mecánicos, estudio fractográfico, estimación de la energía de fractura y el análisis de estructura interna.

Dentro de los resultados de la investigación, se obtendrán los análisis de correlaciones entre la estructura y la energía de fractura, considerando las aportaciones de los componentes, análisis de los modos de propagación de las grietas.

Las conclusiones de esta investigación se centran en que la correlación de los tres factores mencionados en el objetivo, la composición de las rocas, tanto sintéticas como naturales, y su estructura interna, influyen en el valor de la energía de fractura del material. No obstante, para obtener resultados más completos, es importante considerar la especificación de parámetros de la estructura interna, como la cohesión, porosidad y tamaño de partícula, ya que estos tienen un impacto directo en dicha energía.

Abstract

Efforts for mitigate the effects of climate change on a global scale are driving the use and optimization of renewable energies, including geothermal energy. This type of energy harnesses the heat from within the Earth's crust, interacting with groundwater. Geothermal energy has drawn the interest of researchers due to the challenges in optimizing fracture processes for the construction of geological wells. The issues primarily focus on the fracture of the material, specifically the energy required for this process, which increases the permeability of the rocks, facilitating the fluid flow, and this project focuses on analyzing this phenomenon.

The objective of this project is to analyze synthetic rocks (cement-based material and stone aggregates) and natural rocks extracted from geothermal reservoirs to determine a relationship between the number of components in the material, fracture energy, and internal structure. The goal is to assess whether this relationship can influence the optimization of fracture processes.

To carry out this research, synthetic rocks made from cement and stone aggregates are produced, and natural rock samples are used to perform mechanical tests, fractographic studies, fracture energy estimation, and internal structure analysis.

The research results will provide analyses of correlations between structure and fracture energy, considering the contributions of the components, as well as analyses of crack propagation modes.

The conclusions of this research focus on the correlation between the three factors mentioned in the objective, the composition of both synthetic and natural rocks and their internal structure, and how they influence the fracture energy of the material. However, to obtain more comprehensive results, it is important to consider the specification of internal structure parameters such as cohesion, porosity, and particle size, as these have a direct impact on the fracture energy.

Capítulo I: Introducción

La energía geotérmica requiere generar pozos de extracción de vapor a profundidades muy elevadas, por lo general es entre 1 y 5 km de profundidad variando de acuerdo a la ubicación y las condiciones del sitio a perforar [1], tiene como finalidad crear un sistema de intercambio de calor en el cual un fluido es bombeado desde un pozo de inyección que interactúa con el calor de la corteza terrestre, se transforma en vapor que sale por un pozo de extracción e impulsa turbinas que producen energía eléctrica, para optimizar estos sistemas es necesario incrementar la permeabilidad de las rocas con fractura hidráulica, la cual ha demostrado una alta viabilidad para la formación de los pozos geológicos [2]. Soluciones para tomar en cuenta derivan de la estimación de la energía de fractura de las rocas extraídas de los yacimientos geotérmicos simulando su ambiente natural a temperaturas elevadas, es necesario una comprensión más clara de la relación entre el fenómeno de fractura y la rugosidad, analizando la estructura del material con la topografía de la superficie.

El estudio de la fractura geológica proporciona información fundamental sobre los planos de esfuerzo principales en el cuerpo, sus cambios de geometría y rotaciones, de igual manera las fracturas cambian las trayectorias de esfuerzo durante la deformación de los materiales rígidos. [3] Varias propuestas importantes giran en torno a la comprensión de los fenómenos de fractura, la simulación matemática se aproxima a los resultados reales facilitando el acceso de materiales fracturados bajo condiciones difíciles de igualar en un laboratorio, utilizando metodología de elementos discretos, parámetros de autoafinidad que han promovido el interés en la investigación en esta rama [4], [5].

El análisis de la energía de fractura y los mecanismos subyacentes ha permitido mejorar la comprensión sobre la resistencia y durabilidad de los materiales compuestos, desde sus inicios se exploró a la rugosidad y la dimensión fractal de las superficies de fractura a nivel mesoscópico y microscópico, buscando correlacionarlas con las propiedades de fractura de los materiales. En la simulación de propiedades geológicas se han usado materiales compuestos tal como probetas de concreto de alta resistencia, resinas y minerales comprimidos que se ensayan buscando una explicación para la transferencia de esfuerzos a lo largo de las grietas y valores de energía de fractura que puedan calcularse de acuerdo a las propiedades del materiales.

La presente investigación busca contribuir al entendimiento del fenómeno de fractura en materiales compuestos, profundizando en el análisis de la energía de fractura y los factores que influyen en su comportamiento, como la temperatura, número de componentes en el material y el efecto de tamaño. A través de un enfoque experimental y teórico, se pretende generar nuevos conocimientos que permitan optimizar el diseño y la durabilidad de materiales sometidos a diferentes condiciones de esfuerzo y ambientes extremos.

Estructura de la tesis:

La tesis se compone de 7 capítulos, cada uno de los cuales aborda los siguientes contenidos:

Capítulo 1: Presenta el contexto inicial que resalta la importancia de la energía de fractura en los estudios geológicos relacionados con la energía geotérmica. Se realiza una revisión breve de los métodos propuestos a lo largo del tiempo, además de un repaso sobre el contenido específico que se desarrollará en cada capítulo de la tesis.

Capítulo 2: Se centra en la recopilación de los conceptos abordados durante la elaboración de la tesis, abarcando desde la mineralogía y geología básica, para dar contexto sobre el origen del material, hasta los fenómenos de estudio relacionados con la energía de fractura y su cálculo.

Capítulo 3: Contiene el estado del arte, donde se recopilan artículos e investigaciones sobre el fenómeno de la energía de fractura. Se revisan los inicios de estos estudios, su relación directa con la morfología de los materiales en general, desde los metales hasta los materiales compuestos, y se analiza la investigación más reciente sobre la energía de fractura en materiales compuestos.

Capítulo 4: Presenta las ideas principales del proyecto: motivación, hipótesis y objetivos, basados en el estado del arte previamente revisado.

Capítulo 5: Detalla la metodología de la tesis, incluyendo los materiales utilizados, las pruebas realizadas, la preparación de muestras, los ensayos y la caracterización del material.

Capítulo 6: Analiza los resultados obtenidos de acuerdo con la metodología descrita en el capítulo anterior.

Capítulo 7: Este último capítulo expone las conclusiones y sugiere líneas de investigación futura. También se evalúa el cumplimiento de los objetivos y la hipótesis planteada al inicio de la tesis. El capítulo cierra el proyecto con una visión general y reflexiva sobre la investigación realizada.

Capítulo II: Marco teórico

2.1 Mineralogía y geología

2.1.1 Capas de la tierra / Corteza terrestre

El planeta tierra está formado por cuatro partes principales: Hidrósfera, Atmósfera, Biósfera y Litósfera (fig. 1), esta última posee una estructura sólida y se divide de acuerdo a sus componentes:

- **Corteza:** Capa rocosa externa de la litosfera continental y oceánica, con un grosor promedio de 35 y 40 kilómetros, la composición de la corteza es muy variada, la corteza oceánica se encuentra en forma homogénea y la continental en forma heterogénea, esta última posee una superficie compuesta principalmente roca granítica mientras que en la parte inferior su composición es parecida al basalto.
- **Manto:** Capa con más del 82 por ciento del volumen de la Tierra, con profundidades cercanas a los 2900 kilómetros, comprendida de una composición química diferente, donde la parte superior del manto es la peridotita, cuya densidad aumenta a 3.3 g/cm³ cuando la mayoría de los sólidos en la corteza terrestre es de 2.7 g/cm³. A razón de que aumente la profundidad, la densidad y su estructura cristalina se vuelve más compacta.
- **Núcleo:** Última capa cuyas composiciones principales son aleaciones de hierro y níquel con presiones extremas, de esta manera el núcleo posee una densidad media de 11 g/cm³.

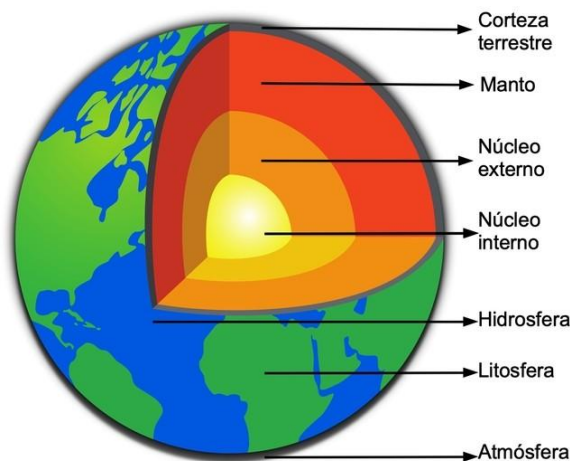


Figura 1: Capas de la tierra (<https://todamateria.com>)

Existe otra clasificación de acuerdo a sus propiedades físicas, son cinco denominadas como: litosfera, astenosfera, mesosfera, núcleo externo e interno. Al hablar de propiedades físicas alude a la densidad, temperatura y presión, al acercarse al centro de la tierra la presión y temperatura incrementan, dando como resultado densidades muy altas densidades en los cuerpos. [6]

2.1.2 Tipos de rocas

Uno de los materiales más abundantes del planeta tierra son las rocas, cuya composición se basa en minerales con estructuras y propiedades diferentes entre sí. Las rocas se clasifican en tres grandes grupos, estos son: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

- **Rocas ígneas:** Formadas a partir de la solidificación del magma, este proviene de las capas interiores de la corteza y se puede encontrar en la superficie debido a las erupciones volcánicas o en el interior del manto; a medida que se enfría con el paso de los años, los minerales comienzan a formar arreglos cristalinos. El ejemplo más conocido es el granito siendo una roca plutónica y abunda en la corteza terrestre, por otro lado, el basalto se denomina como roca volcánica y abunda en la corteza oceánica debido a la alta presencia de volcanes.
- **Rocas sedimentarias:** Así como su nombre se refiere, este tipo de rocas está formado a partir de los sedimentos de otros tipos de rocas y se acumulan en capas superficiales, este proceso es conocido como meteorización. Para llevar a cabo este proceso, el agua, el aire y el hielo glacial suelen transportar los sedimentos, una vez que comiencen a formar capas entre sí, se compactan gracias a su propio peso formando capas más densas denominadas sedimentos detríticos.
- **Rocas metamórficas:** Producidas a partir de las rocas ígneas y sedimentarias, referido principalmente al “cambio de forma” debido a cambios de temperatura y presiones elevadas en la profundidad de la corteza terrestre. Este tipo de rocas se someten a procesos de cambio en bajo y alto grado, dicho cambio depende de la roca madre, siendo los de alto grado los que cambian la identidad de la matriz mientras que los de bajo grado, no. El cambio más típico es la transformación de rocas

sedimentarias a rocas metamórficas por la adición de calor durante la formación de montañas o cercanía del magma. [6]

A continuación se presenta en la figura 2, tres ejemplos de rocas para cada tipo de clasificación, en el caso de las rocas ígneas, las rocas más predominantes son el granito, basalto y tonalita. Para las rocas sedimentarias, los más comunes son esquistos, areniscas y arcillas. Finalmente para las rocas metamórficas, pueden encontrarse a la pizarra, cuarcita y gneis.

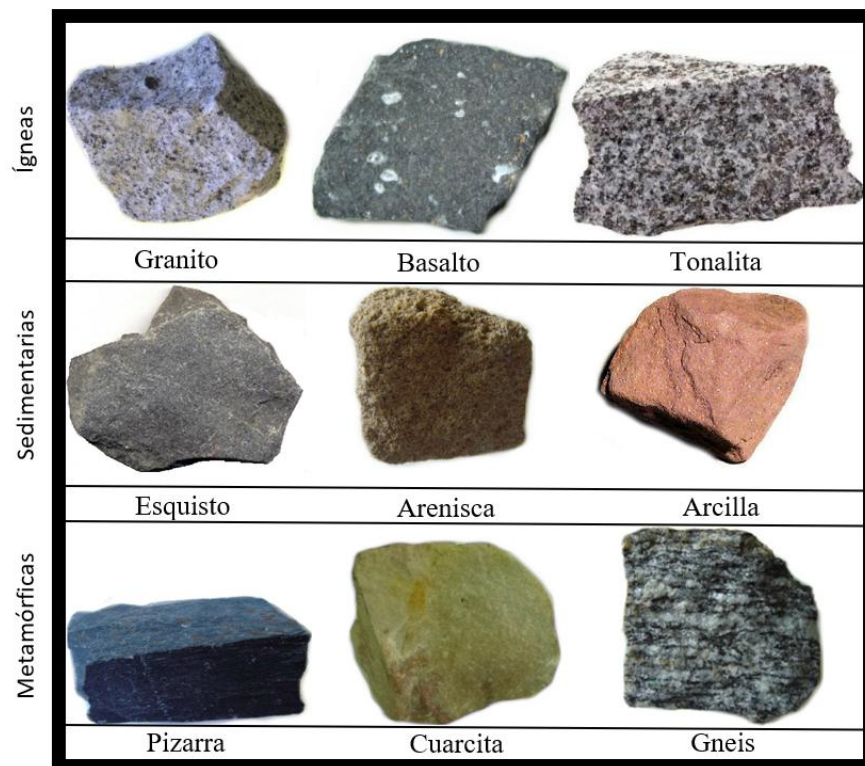


Figura 2: Ejemplos de tipos de rocas. (<https://cienciasnaturales.es>)

2.1.3 Composición mineralógica

El manto se define como la capa existente más larga constituida por rocas en nuestro planeta, la mayor parte del manto se encuentra en estado sólido que experimenta recristalización continua debido a flujos convectivos y procesos tectónicos en el manto litosférico, su composición principal son rocas ultramáficas (contenido muy bajo de sílice y potasio, alto FeO y MgO), calcificándose como rocas metamórficas.

Tabla 1: Composición de la corteza y manto terrestre. [7]

	Manto Peridotita	Corteza Continental	Corteza Oceánica	Basalto	Tonalita
SiO ₂	45.3	60.2	48.6	47.1	61.52
TiO ₂	0.2	0.7	1.4	2.3	0.73
Al ₂ O ₃	3.6	15.2	16.5	14.2	16.48
FeO	7.3	6.3	8.5	11.0	5.6
MgO	41.3	3.1	6.8	12.7	2.8
CaO	1.9	5.5	12.3	9.9	5.42
Na ₂ O	0.2	3.0	2.6	2.2	3.63
K ₂ O	0.1	2.8	0.4	0.4	2.1
H ₂ O	<0.1	1.4	1.1	<1.0	1.2
CO ₂	<0.1	1.4	1.4	<1.0	0.1

En la tabla 1 se presentan valores promedio alrededor del mundo de la composición química de: el manto, corteza continental y corteza oceánica. La composición del manto es fuertemente representada por la peridotita, mientras que la corteza continental presenta variaciones alrededor del planeta debido a su heterogeneidad, aun así, se compone en su gran mayoría de tonalita, y en la corteza oceánica está formada ~99% de basalto.

En la tabla 2 se enlistan las rocas más abundantes en la corteza. Las rocas ígneas, en su mayoría basaltos y gabros, forman la corteza oceánica en la dorsal medio oceánica (MORB en sus siglas en ingles). El granito, granodioritas y cuarzodioritas que forman parte de la formación de granito y tonalita, dominando la corteza continental.

Tabla 2: Abundancia de rocas (vol. %) en la corteza. [7]

Rocas Ígneas	64.7		
Rocas Sedimentarias	7.9		
Rocas Metamórficas	27.4		
<i>Rocas Ígneas (64.7)</i>		<i>Rocas Sedimentarias (7.9)</i>	
Granitos	16	Esquistos	82
Granodioritas/Dioritas	17	Areniscas, Arcosa	12
Sienitas	0.6	Caliza	6
Basaltos/Gabros	66		
Peridotitas/Dunitas	0.3		

Globalmente, las rocas sedimentarias están dominadas por el “shale” (traducido del inglés como esquisto o pizarra), de arcillas de ambientes pelágicos y de plataforma los cuales constituyen el 82% de todos los sedimentos. La composición de las rocas sedimentarias en la corteza oceánica y continental se presentan en la tabla 3.

Tabla 3: Composición química de las rocas sedimentarias e ígneas. [7]

	Areniscas Grauvacas	Esquistos (plataformas)	Pelitas, arcillas pelágicas	Carbonatos (plataformas)	Tonalita	Granito	Basalto (MORB)
SiO ₂	70.0	50.7	54.9	8.2	61.52	70.11	49.2
TiO ₂	0.58	0.78	0.78	-	0.73	0.42	2.03
Al ₂ O ₃	8.2	15.1	16.6	2.2	16.48	14.11	16.09
Fe ₂ O ₃	0.5	4.4	7.7	1.0	-	1.14	2.72
FeO	1.5	2.1	2.0	0.68	5.6	2.64	7.77
MgO	0.9	3.3	3.4	7.7	2.8	0.24	6.44
CaO	4.3	7.2	0.72	40.5	5.42	1.66	10.46
Na ₂ O	0.58	0.8	1.3	-	3.63	3.03	3.01
K ₂ O	2.1	3.5	2.7	-	2.1	6.02	0.14
H ₂ O	3.0	5.0	9.2	-	1.2	0.23	0.70
CO ₂	3.9	6.1	-	35.5	0.1	-	-
C	0.26	0.67	-	0.23	-	-	-

2.2 Energía geotérmica

2.2.1 Enhanced geothermal systems (EGS)

La energía renovable se puede obtener a raíz del aprovechamiento de recursos naturales, este tipo de energía posee cada vez más cobertura mundial con el paso de los años, una de ellas es la energía geotérmica, la cual representa solo una pequeña fracción en el mundo para la obtención de energía eléctrica puesto que se encuentra en auge desde 1974, esta tuvo su origen en Los Alamos National Laboratory (LANL) en Estados Unidos, donde se utilizó por primera vez el concepto de HDR (Hot Dry Rock) para un EGS (Enhanced Geothermal Systems, traducido al español como Sistemas Geotermales Mejorados).

Desde los inicios de la humanidad, cerca de los 10 000 años A.C., se han tenido registros del uso de los recursos geotérmicos, por ejemplo, el uso de géiseres y aguas termales, de los cuales este últimos se utilizaban para cocinar, lavar y propósitos terapéuticos. Fue hasta el siglo XIV donde se instaló la primera el primer sistema de calentamiento geotérmico en Francia y aprovechando este recurso, Italia en 1904 utilizaron por primera vez un generador de electricidad a partir de vapor geotérmico o géiseres, años más tarde Nueva Zelanda comenzó a comerciar con esta energía oficialmente como recursos hidrotérmicos.

En la actualidad se han desarrollado diferentes alternativas para la obtención de la energía geotérmica, en la figura 3, se puede observar tres tipos de profundidades; en la somera, es utilizada principalmente para controles de temperatura del agua de acuerdo a las estación del año. La intermedia puede ir desde 0.1 a 4 km de profundidad, en este rango se encuentra una

gran parte de la generación de energía geotérmica, finalmente cuando la profundidad va entre los 4 a 5 km, se le considera profunda y su única finalidad es la generación de energía.

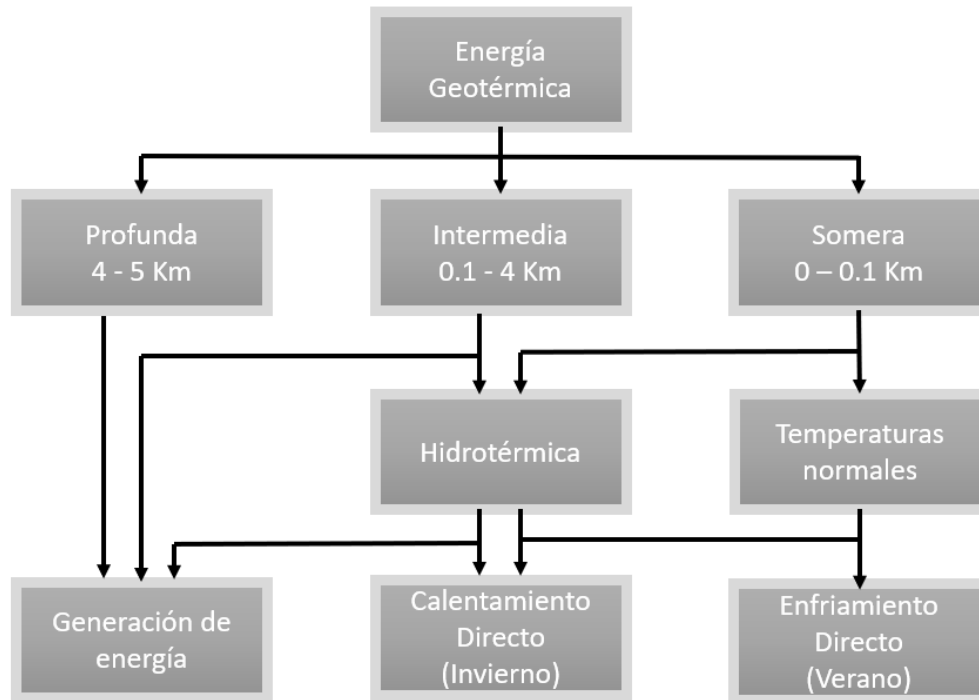


Figura 3: Diferentes alternativas para obtener energía geotérmica. [1]

El desarrollo de la energía geotérmica ha incentivado a nuevos países en la búsqueda de esta fuente de energía a través de la perforación de pozos profundos en zonas detalladamente estudiadas con potencial suficiente para generar energía renovable. En los pozos geotérmicos se tiene profundidades altas o intermedias las cuales varía con respecto a la zona y van desde uno hasta cinco kilómetros de profundidad, en cada zona se encuentra un gradiente térmico diferente para la corteza terrestre, teniendo un promedio general de 25 a 30°C por km. Existen otros gradientes dependiendo en donde se ubique la zona de interés como 50°C/km o 70°C/km hasta 100°C/km en zonas del oeste de Alemania y noreste de Francia, también existen otros gradientes más grandes que son encontrados en las zonas volcánicas llegando hasta los 150°C/km.

El concepto de EGS consiste en la extracción de calor desde la corteza terrestre en rocas que no han sido fracturadas naturalmente sino que a partir de la inyección de agua se aumentó su permeabilidad, de esta manera permite pasar un fluido a través de la roca caliente promoviendo el intercambio de calor. El proceso de producción de pozos geotérmicos se

lleva a cabo taladrando o perforando la corteza terrestre, estimulando la fractura y permitiendo así la circulación del fluido; después de la fractura, el fluido corre a través de los sitios permeables hechos en la roca con el objetivo de calentarse a temperaturas arriba del punto de ebullición, y finalmente el fluido tiende a convertirse en vapor que finalmente se encamina a un pozo de extracción y alimenta una turbina al salir, generando así la energía eléctrica. [1]

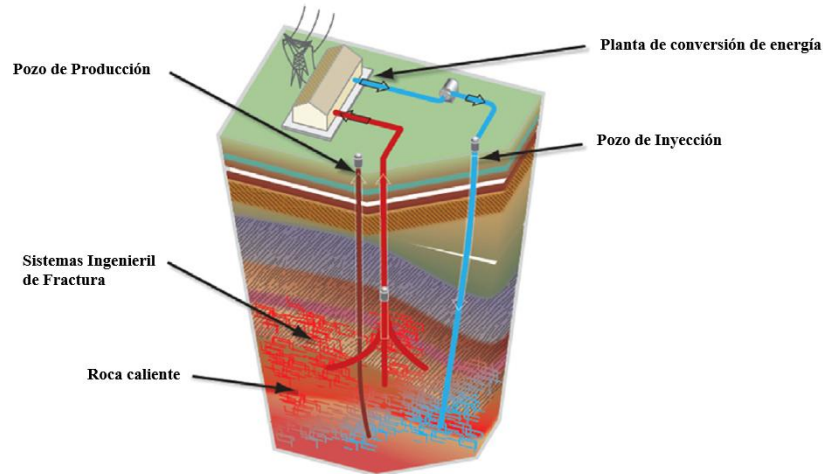


Figura 4: Esquema básico de un EGS. [1]

2.2.2 Sismicidad en EGS

Dentro de los múltiples análisis que existen en un EGS, se han analizado varios datos sísmicos que poseen una relación directa con la inyección del fluido dentro del sistema de fractura en la reserva geotérmica, esto ha destacado la observación frecuente de la magnitud máxima de este evento en comparación a las fracturas hidráulicas y la perforación de pozos que se llevan a cabo en el sitio. [1], [8]

La creación de estos efectos sísmicos se basa principalmente en las fracturas de rocas para crear el pozo geológico dando como consecuencia una reducción en los esfuerzos normales efectivos de las superficies rocosas. Al excavar también se ejercen esfuerzos cortantes en las superficies rocosas generando fracturas que incrementan la permeabilidad, estas fracturas son conocidas como fracturas naturales y son dependientes del esfuerzo efectivo de la roca y que su vez influyen al esfuerzo hidráulico que se ejerce para perforar.

Es común que al crear estas grietas exista un efecto microsísmico, y la magnitud de este fenómeno dependerá de la región en la cual se realizó la perforación, sin embargo, a pesar de ser frecuente, el cálculo de los esfuerzos para fracturar debe ser estudiado cuidadosamente en laboratorio y así aumentar la permeabilidad sin generar fallas que promuevan micro sismicidad. [8]

2.2.3 Medios de esfuerzo de suelos y rocas de yacimientos geotérmicos

Los estudios geomecánicos se enfocan principalmente en las reservas de petróleo, sin embargo, actualmente el enfoque en las energías renovables se incrementa y como consecuencia involucra un avance por parte la investigación en general, en la rama de la energía geotérmica, los pozos de extracción e inyección involucran a problemas mecánicos, fundamentalmente al estado de esfuerzo del material.

El cálculo óptimo del esfuerzo in-situ juega un rol crítico durante la planeación y la seguridad para una excavación económica, se mitiga en gran parte la sismicidad inducida y aumenta la permeabilidad. Conocer los estados de esfuerzo proporciona la información requerida para delimitar las zonas de fractura y zonas que posibilitan la acumulación de flujo y fluido. El estado de esfuerzo en las zonas de fractura está influenciado por la discontinuidad de las rocas y algunos otros fenómenos causados por la naturaleza de la corteza como: la reología, heterogeneidad, esfuerzo térmico, presión de poros, entre otros, además se añade el factor de operación tal como los servicios de inyección y extracción “in situ”. [8]

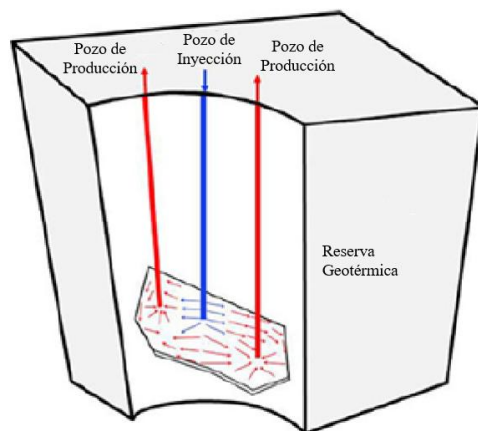


Figura 5: Esquema ingenieril de un sistema geotérmico mejorado. [8]

Se han desarrollado técnicas para la determinación del esfuerzo in-situ, a partir de ensayos de micro-fracturamiento (mini-fract), prueba de pérdida de fluido (leak-off), fracturas inducidas y ensayos hidráulicos para fracturas preexistentes. Los métodos más utilizados dentro de las reservas geotérmicas son la prueba de pérdida de fluido y el micro-fracturamiento, sin embargo, en la terminación de los pozos es difícil tener un aislamiento total de la roca debido a la presencia de las altas temperaturas. Dicha dificultad se refleja en la ausencia de caminos directos para determinar los esfuerzos horizontales σ_H , calcular este valor depende varios parámetros, por ejemplo: tamaño, composición, fluidos, entre otros.

En reservas de petróleo, el método efectivo para medir el esfuerzo mínimo horizontal es el ensayo por micro-fracturamiento, el cual consiste en inyectar un fluido a presión hasta fracturar la roca y permitir el paso de este, en base a este ensayo, existen varias técnicas que se han desarrollado para el cálculo efectivo del esfuerzo en cuestión. [8]

En la actualidad, las investigaciones se enfocan en el sistema de fractura ingenieril (consultar figura 6), abarcando una variedad de tareas a considerar al desarrollar un sistema geotérmico. El estudio de aspectos como daños, permeabilidad, fracturación, perforación, y otros elementos implica la exploración de nuevas tecnologías. Estas tecnologías incluyen la excavación directa a altas temperaturas y presiones, la realización de estimulaciones hidráulicas a escalas kilométricas, la investigación de altos caudales de fluido y la detección de fallas en la roca. A pesar de todos los estudios anteriormente mencionados, siguen existiendo problemáticas críticas sin resolver que concierne a procesos de fractura y circulación del fluido, con el objetivo final de aplicar una fractura limpia evitando el desgaste de energía. [9]

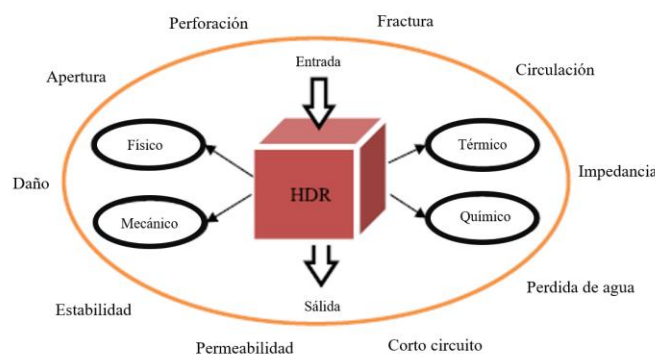


Figura 6: Tareas mecánicas e ingenieriles en la roca caliente seca de un sistema geotérmico. [9]

2.3 Materiales granulados compósitos como rocas sintéticas

El avance en la investigación de los materiales granulados compósitos ha llegado a un punto tal que es posible compararlos con una roca sintética siempre y cuando se cumplan ciertas características, el término para una roca sintética es el siguiente: Material artificial heterogéneo elaborado a partir de materias primas inorgánicas y/o orgánicas tales como resinas, polímeros, vidrios, cerámicos, mezclas base arena, cementos, entre otros [10], [11].

La definición anterior confirma el uso de cementos, ya sean naturales o artificiales para la elaboración de una roca sintética, particularmente hablando de morteros con una granulometría controlada a fin de disminuir la heterogeneidad, sin enfocarse hacia fines constructivos, ya que el mortero por definición es un material utilizado para unir elementos de construcción. Esto beneficia el uso de especímenes artificiales a gran escala que se puede correlacionar a una roca natural debido a la heterogeneidad y propiedades mecánicas que poseen, sin embargo, este campo es reciente por lo cual las comparativas se encuentran en desarrollo. Si bien no es realista esperar que los especímenes artificiales simulen perfectamente las rocas reales, las importantes mejoras recientes sugieren que existe la posibilidad de producir materiales simulados con propiedades mecánicas mucho más similares a las rocas que antes [10].

De esta manera, se podrían explorar de forma accesible los problemas más importantes relacionados con las reservas geotérmicas, tales como la determinación de los esfuerzos necesarios para fracturar las rocas bajo condiciones simuladas en un laboratorio, esto se obtendría al elaborar estudios comparativos entre rocas naturales y rocas sintéticas sea cual sea su materia prima y correlacionarlos entre sí con la finalidad de disminuir la amplia extracción de especímenes de la corteza y facilitar la elaboración de especímenes artificiales en el futuro.

2.4 Mecánica de fractura

2.4.1 Introducción

Los estudios de fractura surgieron como consecuencia de la inadecuación de los criterios de diseño utilizados para la estimación de la resistencia estructural, esto incitó al desarrollo de fallos catastróficos especialmente en recipientes a presión y equipos de ferrocarril, en general fallos en estructuras soldadas, los cuales presentaron fracturas sin apenas deformación plástica y para bajos niveles de tensiones, ejemplos destacables se presentaron durante la segunda guerra mundial para los barcos Liberty y tanques T-2. Se encontraron defectos iniciales que dieron posteriormente a grietas que aumentaron su tamaño y, eventualmente, crecían de forma inestable, generando así una fractura repentina.

El objetivo de la mecánica de fractura es suministrar respuestas a la generación de grietas, definir el criterio de rotura en función a la geometría, cargas y tamaño de las grietas o defectos iniciales en los que ya existían. El crecimiento de una grieta se produce, durante un cierto periodo de forma estable, se requieren progresivos aumentos de carga para producir aumentos en la longitud de la grieta resultando en fallos catastróficos y repentinos.

Planear el criterio de fallo por propagación inestable se asocia al estado de limite, es decir una función de esfuerzos alcanza el valor crítico

$$f(\sigma_{ij}) = f_c \quad (1)$$

Donde σ_{ij} es el tensor de esfuerzos en cada punto del sólido. Cuando $f(\sigma_{ij}) < f_c$ significa que no existe un crecimiento inestable de los esfuerzos. Al superarse f_c , los esfuerzos inestables comienzan a generar puntos de falla, provocando el crecimiento de la grieta. [12]

De acuerdo con Griffith [13] en 1920, “El crecimiento inestable de una grieta se produce cuando la disminución de la energía potencial (W) es mayor que el incremento de la energía superficial (γ) debido al aumento del área (A) de la grieta y su propagación”, es decir

$$\frac{dW}{dA} = \gamma \quad (2)$$

Fue hasta mediados del siglo diecinueve cuando se establecieron puntos cruciales que dieron base a la mecánica de la fractura

- a) Irwing [14] modificó la teoría de Griffith incluyendo el trabajo plástico de disipación (γ_p) en el balance energético.

$$\frac{dW}{dA} = \gamma + \gamma_p \quad (3)$$

Abriendo la puerta a la mecánica de fractura elástica lineal, ya que establece que, para pequeñas zonas plásticas en comparación a la longitud de la grieta, la solución elástica seguirá siendo válida prácticamente en todo el sólido, por lo que la variación de energía potencial podría calcularse a partir de dicha solución elástica.

- b) Se validó las expresiones asintóticas singulares para todos los problemas de grietas, denominando factores de intensidad (K_I, K_{II} y K_{III}) que dependían de la peculiaridad de cada problema: longitud de la grieta, dimensiones de la pieza y valor de la grieta.

Para algunas grietas sujetas a fuerzas externas, es posible derivar algunas expresiones para un cuerpo bajo esfuerzo, asumiendo un comportamiento isotrópico lineal elástico y definiendo coordenadas polares para el inicio de la grieta, puede ser mostrado el campo de esfuerzo en cualquier cuerpo fracturado y está dado por:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} A_n r^{n/2} g_{ij}^{(n)}(\theta) \quad (4)$$

Donde σ_{ij} es el tensor de esfuerzo, r y θ son definidas en la figura 7, k es una constante, y f_{ij} es adimensional función de θ . Para términos de alto orden A_n es la amplitud y $g_{ij}^{(n)}$ es una función adimensional de θ para n términos. El alto orden depende de la geometría del sólido, sin embargo, la solución para cualquier configuración establece un término proporcional a $1/\sqrt{r}$. Como $r \rightarrow 0$, el término se aproxima a infinito, pero los otros términos permanecen finitos próximos a cero. Así el esfuerzo cercano a la punta de la grieta varía con $1/\sqrt{r}$, sin mirar la configuración del cuerpo, que a su vez varía con \sqrt{r} . [15]

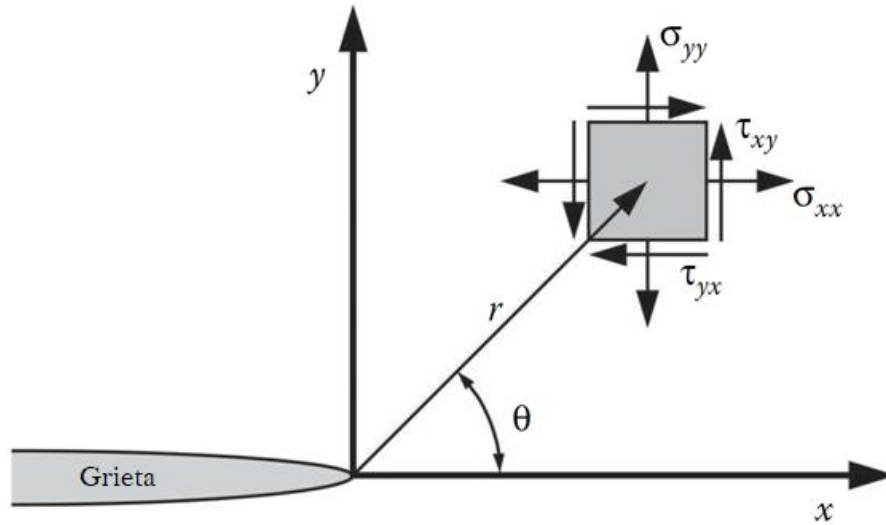


Figura 7: Definición de la coordenada del eje al inicio de la grieta. [15]

2.4.2 Tipos de fractura y tenacidad a la fractura

Hay tres tipos de fractura producidos a partir de una carga, es conveniente cambiar k por el factor de intensidad de esfuerzo K , donde $K = k\sqrt{2\pi}$, este factor de intensidad depende del modo de carga sobre el sólido: K_I , K_{II} o K_{III} , dando como resultado un modo de apertura que se ilustran en la figura 8 y se enlistan a continuación junto con la ecuación del propio campo de esfuerzo que se encuentra delante de la punta de la grieta en un material elástico lineal isotrópico:

Modo I: Carga y apertura, donde la carga principal es aplicada normal al plano de fractura, posteriormente tiende a abrir la grieta.

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta) \quad (5)$$

Modo II: Cizallamiento o corte en plano, corresponde a fuerzas tangenciales paralelas entre sí y tiende a deslizar una cara de la grieta con respecto a la otra en el mismo plano.

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(II)} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(II)}(\theta) \quad (6)$$

Modo III: Desgarre, las cargas tangenciales y las caras de las fisuras son paralelas entre sí, pero en sentido opuesto hacia afuera del plano.

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(III)} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(III)}(\theta) \quad (7)$$

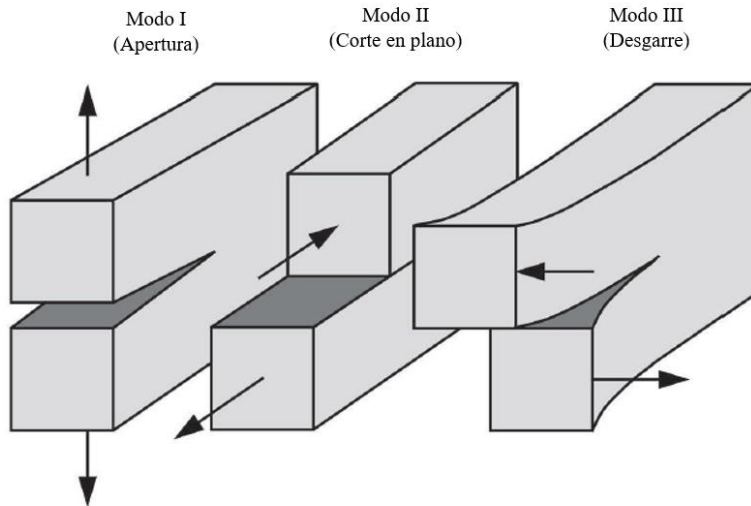


Figura 8: Los tres modos de carga que pueden iniciar una fractura. [15]

Las soluciones se obtienen cuando $r \rightarrow 0$, validando solamente en el contorno de la fisura, independientemente de la geometría y condiciones de contorno del sólido. Por ello es válida para cualquier problema, influyendo en el valor numérico de factores de intensidad de tensiones K_I que debe ser evaluado para cada caso particular. En el caso de que la figura se encuentre en un sistema sometido a esfuerzo constante en todo su contorno, el valor de K_I es

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (8)$$

Donde σ es el esfuerzo en puntos suficientemente alejados de la grieta.

La solución en esfuerzos es singular, es decir, cuando $r \rightarrow 0$, los esfuerzos tienden a infinito y los desplazamientos verticales v toman valores diferentes para los dos labios de la fisura. El estado de esfuerzo para cualquier fisura otorga un valor definido para el factor de intensidad de esfuerzos, en la mecánica de fractura elástica lineal adopta el siguiente criterio: el valor límite del estado tensional se alcanzara cuando se inicie la propagación de la fractura K_I , alcanzando dicho valor recibe el nombre de tenacidad a la fractura K_C .

$$K_I = K_C \quad (9)$$

La tenacidad a la fractura no es una característica del material, ya que, para un mismo material, las mismas cargas y la misma fisura la rotura se produce para distintos valores del espesor de la probeta. Para valores muy grandes en el espesor de la probeta, se alcanza un valor estable (y mínimo) que se conoce como K_{IC} , tenacidad a fractura en deformación plana.

Un crecimiento de la fisura no puede aplicarse a través del factor de intensidad de tensiones, Griffith sostuvo que: “El crecimiento de una fisura en una estructura se produce cuando la energía que se requiere para formar unos nuevos labios de la grieta puede ser liberada por la estructura”. La energía liberada por el sistema es conocida como “Energy release rate” y la resistencia a la progresión de la fisura es conocida como “Crack resistance force” [12].

2.4.3 Módulo de Weibull

La obtención del módulo de Weibull contribuye a la evaluación estadística de la resistencia de los materiales, estableciendo la probabilidad de encontrar una imperfección que exceda un tamaño crítico y genere una fractura en el material, esta probabilidad aumenta a medida que se incrementa el tamaño del componente. La resistencia los materiales generalmente varía ya que no es fácil controlar la disposición y homogeneidad de la estructura interna del material dando como resultado dispersiones amplias en la resistencia, en este caso los materiales frágiles o quasi-frágiles no poseen una distribución gaussiana al evaluar esta propiedad, indicando que el tamaño de las imperfecciones, junto con su orientación y ubicación nunca es el mismo, concluyendo que en la actualidad no es posible controlar completamente la distribución de las imperfecciones. [16]

La distribución de Weibull describe la fracción de las muestras que fallan ante la magnitud de distintos esfuerzos aplicados, es decir, pequeña fracción de las muestras se fracturan bajo esfuerzos aplicados bajos, ya que contienen imperfecciones lo suficientemente grandes para provocar una fractura; la mayoría falla ante un esfuerzo intermedio y solo unas cuantas contienen imperfecciones pequeñas y fallan hasta que se aplican esfuerzos grandes. La aplicación directa del modelo de Weibull para el concreto y el mortero ayuda a predecir el

momento de la falla del material, sin embargo, es complicado estandarizar un valor ya que la redistribución de los componentes no siempre es la misma. [17]

Fórmula para determinar el módulo de Weibull:

$$F(V_o) = 1 - P(V_o) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (10)$$

Donde $F(V_o)$ es la probabilidad de falla, $P(V_o)$ probabilidad de supervivencia, es decir, la probabilidad que no se fracture el material bajo esfuerzo aplicado, σ es el esfuerzo aplicado, σ_0 es la resistencia característica (resistencia promedio), m es el módulo de Weibull indicando la variabilidad de la resistencia, para metales y aleaciones, el módulo es alto (~ 100), mientras que para cerámicos tradicionales es bajo (~ 3)

Para determinar el módulo de Weibull, es necesario aplicar despeje en la ecuación

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(V_o)} \right) \right] = m(\ln \sigma - \ln \sigma_0) \quad (11)$$

Así obteniendo m y posteriormente mostrar los resultados en una gráfica.

2.4.4 Zona de proceso de fractura

La roca o el concreto se conocen por poseer estructuras compuestas con comportamiento cuasi frágil bajo una carga, se ha observado experimentalmente que estos materiales exhiben una zona elástica donde se localizan microgrietas al iniciar la fractura, llamada zona de proceso de fractura (“FPZ” por sus siglas en inglés Fracture Process Zone), el cual es gobernada por un complicado mecanismo de tenacidad. Algunos parámetros han reportado influencia en esta zona de proceso tal como, tamaño del espécimen, longitud de la grieta, porosidad y la tasa de carga [18]. Es la FPZ la cual es responsable la no aplicación de una fractura mecánica lineal elástica y la exhibición del comportamiento del efecto de tamaño en el concreto [19].

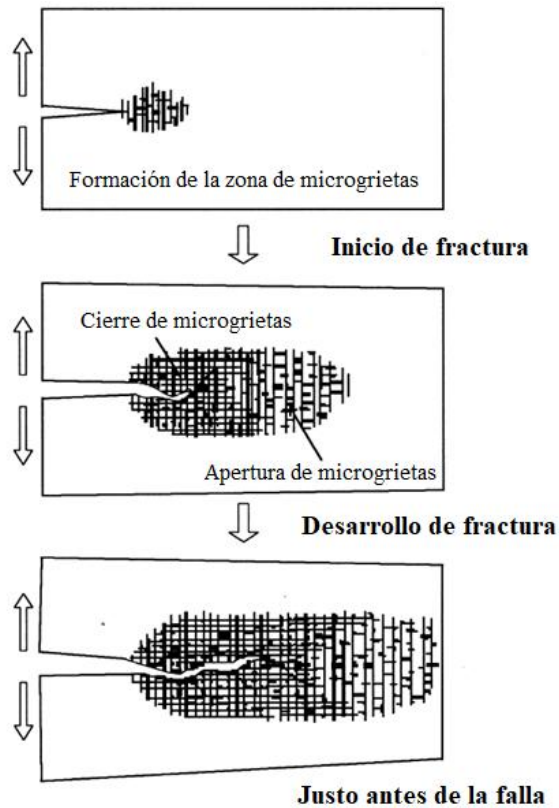


Figura 9: Ilustración de la zona de proceso de fractura [20]

La caracterización de esta zona es de importancia fundamental en el desarrollo de la mecánica de la fractura moderna no lineal para el concreto. Existen limitadas técnicas para investigar las microgrietas, algunas de ellas son basadas en pulsos ultrasónicos de alta velocidad, emisión acústica, radiografías por rayos X, técnicas de fluorescencia, observaciones ópticas, entre otras. Otro grupo de métodos basados en la medición de la deformación, tal como resistencia eléctrica tenso-métrica, tensometría fotoelástica, métodos Moiré, interferometría laser e interferometría holográfica. [21].

La caracterización experimental es desafiante debido a la heterogeneidad del concreto y al estado de esfuerzo tridimensional dan por lo general un perfil de la grieta que no es recto, también se presenta un alargamiento adicional en la zona de fractura que puede calcularse introduciendo las deformaciones unitarias adicionales del espécimen sobre la longitud de la zona de fractura. [22]

Con el paso de los años, las investigaciones se centran en encontrar relaciones para explicar los procesos de fractura, el termino de “Fracture Process Zone” es la zona de proceso de

fractura que exhibe un tamaño finito y parte del daño progresivo en el material donde las microgrietas aparecen y coalescen entre sí formando grietas de tamaño macroscópico, se busca relacionar estos fenómenos con la finalidad de predecir los patrones de fractura en los materiales. [23], [24].

2.4.5 Efecto de tamaño

La mecánica de fractura se ve afectada fuertemente por la ley de efecto de tamaño en el espécimen que, de acuerdo a Bažant [25] es una manifestación de la estadística en materiales heterogéneos, el fenómeno se puede apreciar en especímenes cuya misma geometría sea la misma sin embargo, los tamaños son diferentes (o con sección diferente hablando de una muesca). Las propiedades como la resistencia a la compresión del espécimen son influenciadas por la variabilidad inherente de la microestructura, un ejemplo es el concreto, donde la pasta de cemento y el agregado no están distribuidos uniformemente, lo que da como resultado una microestructura heterogénea con variabilidad en la resistencia mecánica. A medida que el tamaño del espécimen de concreto aumenta, la variabilidad de la resistencia también aumenta, lo que a su vez reduce la resistencia promedio del material.

El efecto tamaño en el concreto es una manifestación de la ley estadística de la escala, que indica que las propiedades de los materiales heterogéneos cambian con la escala de observación. En otras palabras, a medida que el tamaño del elemento de concreto aumenta, las propiedades mecánicas del material cambian en una forma no proporcional, lo que resulta en una reducción de la resistencia promedio [26].

Otro de los aspectos del efecto de tamaño es la respuesta dúctil antes de la fractura en el mismo material, pero con especímenes de tamaño diferente, es decir, dos estructuras geoméricamente similares pueden caracterizarse por una respuesta dúctil para un tamaño pequeño y una respuesta frágil para un tamaño grande. Esto es una consecuencia natural de la desigualdad en la energía elástica almacenada por unidad de volumen y en la energía de fractura disipada por unidad de área [22], esto da pie a la obtención de múltiples parámetros que ayudan a entender el comportamiento de la microestructura bajo condiciones límites de esfuerzos, tal como la energía de fractura verdadera G_F , y como la energía de fractura dependiente del tamaño del espécimen G_f , estas variables son obtenidas gracias al ensayo de

especímenes en grandes cantidades en laboratorio y al estudio de la estructura interna de propiedades como el módulo de elasticidad y los esfuerzos máximos del material. [19]

2.4.6 Energía de fractura – Método RILEM

La energía de fractura G_f se define como la energía total disipada por unidad de área del ligamento fisurado, se obtiene en base al trabajo ejercido por la fuerza (área bajo la curva de carga-desplazamiento) en tres puntos de flexión sobre una viga con muesca central) asociado con el trabajo gravitacional realizado por el peso propio de la viga. [27]

La metodología para la determinación de la energía de fractura se estableció en 1985, publicado por RILEM (traducido del francés, Reunión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales, sistemas de construcción y obras) en la cual recomienda ampliamente una serie de instrucciones a seguir en vigas de concreto para la estimación de la energía de fractura. Surgieron propuestas por J. Nakayama en 1965 [28] y por Tattersall y Tappin en 1966 [29] definiendo parámetros fundamentales, Hillerborg en 1985 [30] escribió la base actual sobre la metodología recomendada para el cálculo de la energía de fractura G_f .

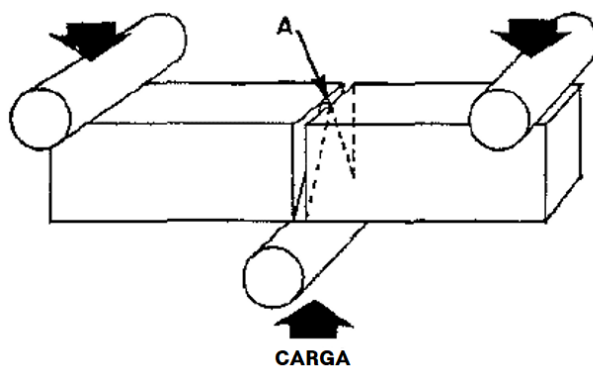


Figura 10: Modelo esquemático de un sistema a flexión. [29]

Basado en un sistema a flexión de acuerdo a la figura 10, se muestra la geometría del espécimen recomendada, donde en la sección A, la carga es aplicada generando esfuerzos en una sección representativa triangular iniciando la grieta a partir de la energía elástica generada para fracturar el espécimen. El crecimiento de la grieta toma lugar de manera controlada, el potencial de energía del sistema es incrementado debido a la flexión del espécimen, la fractura se efectúa dando una típica curva de carga-deformación o en algunos

casos se puede obtener una curva fuerza de flexión - tiempo, la fractura es controlada si se asemeja a la curva "C" en la figura 11, en la curva "A" de la misma figura se realizó una carga catastrófica (generalmente obtenidos por los materiales más rígidos y sin velocidad de carga establecida), se espera que para genera una curva tipo semi estable "B" y controlada "C" exista una manipulación de la velocidad de carga y se prediseñe una fractura ficticia antes de iniciar el ensayo.

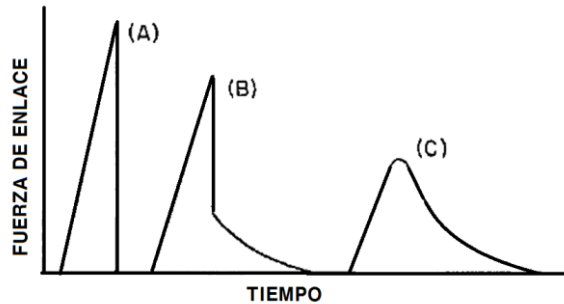


Figura 11: Curvas típicas de fracturas, (A) catastróficas, (B) Semi estables y (C) Estables [28]

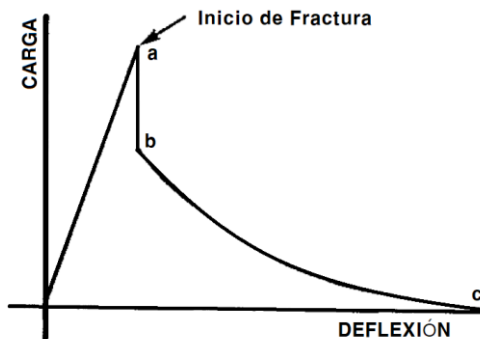


Figura 12: Curva carga-deflexión típica, donde "a-b" se genera la fractura de manera catastrófica y "b-c" de manera controlada. [29]

El método RILEM se clasifica como una recomendación, no normada con la finalidad de encontrar G_f con base a una curva de carga-deflexión controlada, figura 12. [30]. Cada una de las áreas mostradas en la figura 13 se suman entre sí para obtener el trabajo de fractura W , (3) que representa el área bajo la curva de dicha grafica.

$$W = W_0 + W_1 + W_2 \quad (12)$$

Donde

$$W_1 = P_1 \times \delta_0 \quad (13)$$

De acuerdo con la figura 13, es posible que $W_1 = W_2$, así reordenando la ecuación (5) de la siguiente manera.

$$W = W_0 + 2(P_1 \times \delta_0) \quad (14)$$

Donde δ_0 es la deflexión y P_1 es la fuerza aplicada en un área. El efecto de P_1 en W ocasiona una reducción del 40-60% en la cantidad de energía en W (marcado en la gráfica en color rojo), justo en este lugar existe el momento máximo ubicado en el punto medio de la longitud de la viga.

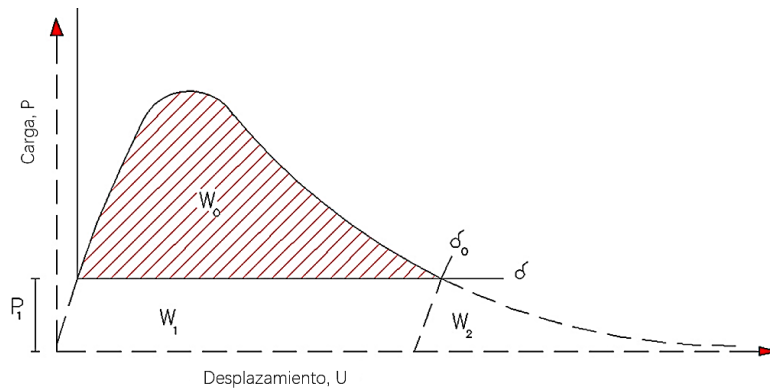


Figura 13: Curva carga-desplazamiento controlada. [31]

La ecuación para determinar la energía de fractura de acuerdo al comité RILEM, es la siguiente.

$$G_f = \frac{(W_t + mg\delta)}{b(d - a)} \quad (15)$$

Donde $W_t = W$, es decir, el área total bajo la curva carga-desplazamiento, $m = m_1 + 2m_2$, en el cual m_1 es el peso de la viga entre los dos soportes, este peso se multiplica por un factor l/L y m_2 es el peso de las herramientas de carga no unidas a la maquina pero que se adicionan a la carga influenciando en la fractura, δ es la deflexión máxima de la viga al momento de la falla, g es la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$), b y d son las medidas transversales de la sección, finalmente a es la profundidad de la muesca. [31]

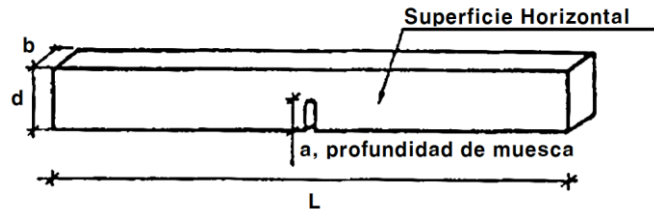


Figura 14: Esquema estándar de viga de concreto. [30]

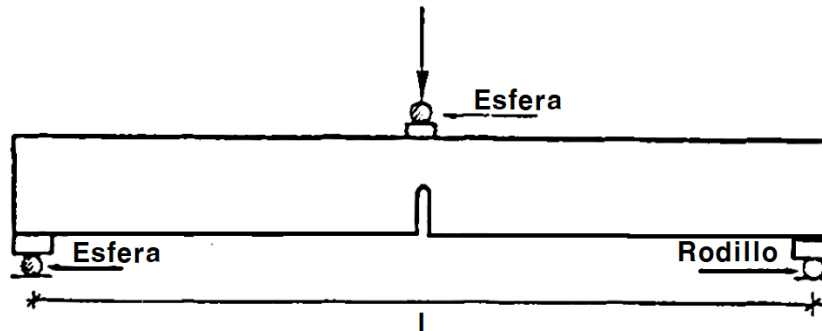


Figura 15: Esquema estándar de viga de concreto, vista de frente. [30]

El ensayo más directo para calcular la energía de fractura es el ensayo uniaxial a flexión, para determinar G_f , el ensayo debe ser estable, aumentando la carga a velocidad lenta, sin ningún cambio en la aceleración. Desafortunadamente existe una dificultad para elaborar este ensayo de manera estable, ya que no existe una normativa la cual especifique la obtención de la energía de fractura en concreto.

Durante el paso de los años, se ha propuesto relacionar parámetros a la energía de fractura, uno de ellos es la longitud característica la cual es una medida estandarizada para calcular la tenacidad del concreto y a su vez es la distancia en la que se puede encontrar una fisura que represente el inicio de una falla potencialmente catastrófica en el concreto en base a la superficie del elemento [32], [33], calculándose con la siguiente ecuación:

$$l_{ch} = \frac{EG_f}{f_t^2} \quad (16)$$

Donde E es el modulo de elasticidad, G_f es la energía de fractura y f_t^2 es la resistencia a la tensión, resultando en un parámetro a escala de milímetros, la longitud característica de un medio no local continuo se interpreta el radio en el que la energía de fractura se disipa, siendo proporcional aproximadamente 2.7 veces el tamaño máximo del agregado [33].

Capítulo III: Estado del arte

A continuación, se discuten trabajos relevantes que fundamentaron las bases para el estudio mecánico de la fractura, así como también estudios referentes a la energía de fractura en materiales cuasi frágiles, de los cuales se presentaron trabajos que intentaron entender la morfología de la superficie de fractura, así como estudios relacionados al uso de morteros como rocas sintéticas.

La mecánica de fractura sus orígenes formales en 1920, gracias a A.A. Griffith con su artículo “The Phenomena of Rupture and Flow in Solids” [13], el objeto de estudio se centró en la relación que debe existir entre el esfuerzo necesario para causar una fractura en los sólidos elásticos y el esfuerzo para romper los enlaces moleculares. Esta investigación aportó lo necesario para iniciar la mecánica de fractura, se definió por primera vez el termino esfuerzo de fractura o carga de ruptura, donde se estimó que el producto de la raíz cuadrada de la longitud de la grieta y el esfuerzo de fractura dan como resultado una constante, además muestra que el esfuerzo en la punta de la grieta puede ser más de 10 veces más grande que el esfuerzo medible en un ensayo.

En el año 1957, Irwing publicó el artículo “Analysis of Stresses and Strains Near the End of Crack Traversing a Plate” [14], el cuál dio continuación al trabajo de Griffith. El desarrollo de la investigación en fractura se amplió debido a los fenómenos ocurridos durante la segunda guerra mundial, fenómenos observados de múltiples materiales utilizados para soldar en naves, barcos, tuberías de gas, cabinas presurizadas, entre otras. Se modificó la teoría de fractura de Griffith añadiendo los planos de esfuerzos elásticos y deformaciones cerca de la ruptura en un material frágil, dando como resultado el factor de intensidad $\left(\frac{EG}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$, se explica que los valores de G (fuerza que tiende a causar la extensión de la grieta) y σ_{xy} (factor de esfuerzo uniforme) pueden evaluarse midiendo la deformación local en posiciones seleccionadas y concretas, enfatizando que los valores obtenidos en la práctica comúnmente tienden a infinito debido a los diminutos valores que arrojan los extensómetros.

El estudio de las fracturas en el concreto dio sus inicios en 1976 por Hillerborg et al. con su artículo “Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements” [34], donde la mecánica de fractura es introducida por primera vez en el análisis de elemento finito dando la posibilidad de analizar los múltiples esfuerzos en la punta de la grieta en una fractura, estos esfuerzos varían con el espesor de esta. El estudio generó resultados teóricos como experimentales, abriendo así la posibilidad de estudio a problemas más complejos de la mecánica de fractura utilizando herramientas computacionales.

En 1982 Mandelbrot, en su libro “The Fractal Geometry of Nature” define al fractal como un objeto irregular en una dimensión fraccionaria, descomponiéndose en fragmentos similares a la forma original. [35] Más adelante en 1984 con su artículo “Fractal Character of Fracture Surfaces of Metals” [36], teorizó que una superficie fracturada de un metal puede verse como un fractal, ya que una superficie del metal es altamente rugosa, mientras que los fractales tienen superficies infinitamente rugosa, suponiendo así que ambas se relacionan entre sí, aunque no son lo mismo. Sus ensayos se basan en la relación lineal que existe entre la dimensión fractal que posee el material con su energía de impacto, entre más alta sea la dimensión fractal, es decir mientras sea más lisa la superficie de fractura, la energía de impacto disminuye.

En 1985, A. Hillerborg con su investigación “The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy G_F of Concrete” [30], escribió la base actual sobre la metodología recomendada por RILEM (Reunión Internacional de Laboratorios y Expertos de Materiales, sistemas de construcción y obras) para el cálculo de la energía de fractura G_F en vigas de concreto y mortero, en la cual se propone la metodología mediante ensayos en flexión a tres puntos con vigas. Se obtiene una curva carga deformación cuya área representa la energía necesaria para fracturar el material.

En 1990, E. Victor et al. con su artículo, “Fractal Characterization of Fracture Surfaces in Concrete” [37], estudiaron la rugosidad de superficies de concreto a través de un perfilómetro especialmente diseñado para relacionarlo con, la dimensión fractal, la tenacidad a la fractura y la dirección de la propagación de las grietas. Obtuvieron valores para las dimensiones fractales para los especímenes ensayados de aproximadamente 1.20 a una escala microscópica y a escala macroscópica a 1.10, además se concluyó que la rugosidad en la fractura no varía significativamente con la dirección de la propagación de la fractura. En esta investigación se propuso un nuevo método de evaluación tipo post-mortem abriendo así nuevos intereses en el área de la fractura. Estos trabajos despertaron un interés en entender la morfología de la superficie de fractura en un concreto, sin embargo, no se consolidó ninguna base con el paso de los años referente al estudio fractal.

En 1991 J. Mazars et al. con su artículo “Size Effect and Continuous Damage in Cementitious Materials” [38], se centraron en la dependencia entre las propiedades mecánicas de estructuras de concreto y sus tamaños, remarcando dos tipos de efecto de tamaño, el primero está basado en la probabilidad, relacionado a distribuciones de los defectos aleatorios en el material, el segundo es puramente determinista, relacionado a la propagación de fractura en un medio heterogéneo frágil, todo lo anterior se elabora con un modelo de daño sobre probetas de vigas fracturadas bajo flexión en tres puntos. Ambos tipos de efecto de tamaño fueron combinados en un solo modelo no local mecánico de daño continuo donde el daño inicial comienza por la propagación de microgrietas en tensión, basado en la distribución de Weibull.

En 1993 David A. Lange et al. trabajó en el artículo “Relationship Between Fracture Surface Roughness and Fracture Behavior of Cement Paste and Mortar” [39], donde buscó una correlación entre la rugosidad de la superficie de fractura y la tenacidad a la fractura de la pasta de cemento y el mortero utilizando un microscopio confocal creando un mapa topográfico tridimensional. Esta investigación dio un paso más allá en el análisis fractográfico, siendo la prima vez que se utilizaba un escaneo 3D para la topografía de una superficie fracturada en concreto, y para llegar a estos resultados, se utilizó el microscopio

confocal. Se caracterizó la rugosidad mediante la técnica anterior mencionada donde un valor RN el cual es llamado rugosidad computada, en este artículo se demostró que existe una alta correlación del RN con los datos generados para un modelo de fractura de dos parámetros que incorporan el comportamiento cuasi frágil, así como también RN se correlaciona con la mecánica de fractura elástica lineal del material.

En 1994 se publicó el artículo “Fracture Surfaces: A Critical Review of Fractal Studies and a Novel Morphological Analysis of Scanning Tunneling Microscopy Measurements” por Victor Y. et al. [40], donde se analiza minuciosamente sobre los estudios fractales obtenidos a partir del microscopio de efecto túnel (STM por sus siglas en inglés) en cerámicos y metales. Este artículo se realizó con la finalidad de unificar los avances científicos sobre el estudio fractal a partir de la compilación de datos experimentales, debido a que existen múltiples controversias sin resolver, una de ellas son los múltiples valores de la dimensión fractal que arrojan los materiales variando con respecto a su método de medición, otra problemática es la posible universalidad que puede existir en el coeficiente de rugosidad buscado en el material, considerando la hipótesis de que sea una variable independiente de la dimensión fractal, aunado a esto, las dificultades observadas en relación a la escala del análisis. Se expresa una problemática más, ya que no existe un modelo matemático para diferenciar entre dos superficies con similar dimensión fractal, pero que a ojo humano poseen diferentes morfologías, es por ello que se analizan superficies de fractura con STM a escalas nanométricas en busca de una relación, a pesar de la gran cantidad de experimentos, los resultados no son concluyentes. El objetivo de este artículo es sugerir un nuevo método de caracterización de la superficie de fractura, la cual emplea información sobre la morfología de la estructura más allá de dos puntos de correlación. Como conclusiones de este extenso artículo fue posible entender mejor los procesos fundamentales que llevan a las superficies de fractura además de determinar una conexión entre las características propias de las superficies de fractura y las propiedades de los materiales, a pesar de los esfuerzos de la investigación, queda claramente demostrado que un solo valor del exponente de rugosidad no existe para todos los materiales bajo una fractura arbitraria bajo determinadas condiciones para cualquier escala, su problema mayor fue la gran variación de los resultados en las

pruebas, dificultando así su universalidad. Concluyendo de esta manera que no se encuentra una relación entre el exponente de rugosidad (o la dimensión fractal sobre superficies de fractura) con la tenacidad a la fractura, o cualquier otra propiedad mecánica.

En 1995, A. Carpinteri & B. Chiaï, publicaron el artículo “Multifractal Nature of Concrete Fracture Surfaces and Size Effects on Nominal Fracture Energy” [41], donde se elaboró una investigación post-mortem en superficies de fracturas de concretos basados en flexión directa, en busca de una interpretación mecánica de la dimensión fractal, introduciendo la renormalización, la cual consiste en la definición de una nueva propiedad mecánica universal con una dimensión física dependiente de la dimensión fractal del daño del material representado en la microestructura, utilizado también en física estadística. Para esta investigación se realizaron tres métodos para la determinación de la dimensión fractal de 70 perfiles de concreto fracturados, de los cuales fueron discretizados con un intervalo horizontal de 0.1 mm proveyendo 1000 puntos para un perfil de 10 cm, digitalizados en 2D para posteriormente investigar sus propiedades fractales con métodos algorítmicos: “Divider Method, Box-Counting y Spectral”, de los cuales, solo el método Spectral es un proceso estadístico. Además, en esta investigación también se analizó el efecto de tamaño influenciando la energía de fractura, al incrementar al mismo tiempo con el tamaño del espécimen. Como conclusión de esta investigación, se llegó a un vínculo entre la dimensión fractal y la interpretación mecánica el cual fue el siguiente: El efecto del desorden microestructural en el comportamiento mecánico se vuelve progresivamente menos importante a grandes escalas, mientras que, a pequeñas escalas, representa un componente fundamental, siguiendo así una tendencia no lineal.

En 1997 E. Bouchaud con su artículo “Scaling Properties of Cracks” [42], realizó una investigación sobre la fractografía, haciendo una revisión sobre las observaciones vistas en diferentes materiales investigando si la fractura de materiales heterogéneos puede ser vista como una fase dinámica de transición. Se concluye en su trabajo que la longitud de correlación es fuertemente dependiente del material, las mismas propiedades de escala son observadas para materiales metálicos para escalas arriba de 1 mm, mientras que para el vidrio

apenas se extienden arriba de los 100 nm, tanto en la zona espejo como en la zona difusa, la longitud de correlación parece ser del orden de la mayor heterogeneidad del material.

En 2000 V. Mechtcherine con el artículo “Fracture Mechanical Behavior of Concrete and the Condition of the Fracture Surfaces on Different Scales” [43], se centra en analizar la rugosidad y la dimensión fractal de la superficie de fractura a nivel mesoscópico y microscópico con la finalidad de encontrar una correlación con las propiedades de fractura del concreto. El estudio se llevó a cabo en probetas de concreto normalizadas con cemento Portland CME 1 32,5 R, alcanzando resistencias a los 28 días de 96 MPa y 44 MPa, de los cuales se ocuparon en un ensayo uniaxial de tracción. Se analizó la condición de falla a dos escalas, primero para la superficie de fractura completa se utilizó la mesoescala, mientras que los componentes tales como superficies puntuales de fractura, agregado fracturado, pasta de cemento, pasta de cemento con interfaz de agregados, se analizó microscópicamente. Concluyendo que a altas rugosidades y a altos valores de dimensión fractal global de la completa superficie de fractura, indican una mejor transferencia de esfuerzos de tracción a lo largo de la grieta.

En 2001, el artículo escrito por M. Hinojosa, el cual lleva por nombre “La Rugosidad de las Superficies: Topometría” [44], detalla lo necesario para el análisis topométrico de una superficie, se recurre a la cuantificación de la rugosidad y para ello se utiliza el perfilómetro o rugosímetro, este consta de una fina punta que entra en contacto con la superficie a analizar, se realiza un barrido controlado en línea recta con variaciones de alturas que se convierten en señales eléctricas y se registran o se grafican. Otras metodologías utilizadas son el escaneo 3D, microscopia de fuerza atómica el cual obtiene escalas mucho más finas que un perfilómetro, microscopios ópticos y microscopio confocal. Se concluye que la rugosidad no puede ser considerada como propiedades de superficie ya que depende del tamaño de la muestra.

En 2002 M. Hinojosa et al. publicó el artículo “Fractometría y propagación autoafín de grietas en materiales heterogéneos” [45], en el cual se aborda la comprensión del fenómeno de propagación de grietas, sin embargo en publicaciones anteriores, se demostró que no es posible relacionar de manera clara los parámetros fractales con propiedades mecánicas macroscópicas, si no que ahora la descripción y cuantificación del carácter fractal se basa en su exponente de Hurts o exponente de rugosidad y la longitud de correlación. Se denota que, en los exponentes de rugosidad en las superficies varia, para altas velocidades de fractura es un exponente universal de 0,8, mientras que para bajas velocidades de fractura es un orden cercano al 0,5, las propiedades de escala también hacen variar este exponente, a escala nanométrica y milimétricas arrojan valores de coeficiente diferentes. Para este artículo se utilizaron tres materiales diferentes para su análisis fractométrico autoafín, se utilizó el aluminio tipo A319, vidrio ópalo y polipropileno, los cuales fueron fracturados y analizados en ATM y SEM. Los resultados presentados lograron respaldar la hipótesis inicial del artículo, la cual consiste en analizar si la longitud de correlación de las superficies de fractura autoafines está ligada al tamaño de las mayores heterogeneidades presentes en la microestructura de los materiales, siendo válida para los materiales presentados.

En 2003, C.V Nielsen y N. Bicanic, con su investigación “Residual Fracture Energy of High Performance and Normal Concrete Subject to High Temperatures” [46], analizaron la energía de fractura a diferentes temperaturas, en esta ocasión de 300° a 400°, comparando principalmente contra la temperatura ambiente, se encontraron de un 50% más de energía de fractura calculada para temperaturas elevadas, así mismo obteniendo la longitud de correlación y llegando a la conclusión que la temperatura elevada genera un aumento en la ductilidad del concreto.

En 2003 E. Bouchaud se publicó el artículo “The morphology of fracture surfaces: A tool for understanding crack propagation in complex materials” [47], donde se elabora una revisión sobre experimentos que conciernen a la morfología de superficies de fractura de distintos materiales, a diferentes escalas y diferentes técnicas con la finalidad de separar aquellos parámetros morfológicos “universales” de los materiales y mostrar como la morfología se

relaciona con los mecanismos de propagación de grietas. Los experimentos se llevaron a cabo en probetas de barra con muescas expuestas a esfuerzos de tracción propagando una fractura de modo I en la probeta. Se concluyó que existe una correlación entre la superficie de fractura y las pequeñas cavidades dañadas que generan grietas antes de que aparezcan para generar la falla. A pesar de todos los esfuerzos realizados, se continuaron con las preguntas abiertas a la investigación, relacionados a la morfología de la superficie de fractura del material, cuestionándose sobre la universalidad de un exponente de rugosidad en diferentes materiales y la propuesta de monitorear la evolución de las grietas en materiales para el estudio del efecto elasto-dinámico, vinculándose a estudios de escalas de tiempo y longitud, abriéndose la puerta al estudio de nuevos fenómenos.

En 2005 por G. Mourot et al. en su artículo “Scaling Properties of Mortar Fracture Surfaces” [24], explica que existe una relación lineal para morteros entre el tamaño del espécimen (“size effect”) y la máxima longitud de correlación autoafin, el efecto de tamaño influye en la rugosidad del material, muestra una diferencia en la morfología de las superficies de fractura entre especímenes de distintos tamaños, estas superficies de fractura fueron evaluadas en modo I, los especímenes mostraron que aparece un exponente de rugosidad global que depende del material pero también depende en el desarrollo del daño ejercido a escalas de gran longitud, así demostrando el efecto de tamaño.

Así en el mismo año (2005), se realizó una investigación por G. Pijaudier-Cabot et al. el cuál llevó el nombre de “Correlation Between the Internal Length, the Fracture Process Zone and Size Effect in Model Materials” [23], esta investigación se centró en determinar una relación entre el ancho de la zona de proceso de fractura con un análisis de emisión acústica y la longitud interna de la grieta, para el mortero observando su relación con el efecto de tamaño. La zona de proceso de fractura exhibe un tamaño finito que parte del daño progresivo en el material donde las microgrietas aparecen y coalescen entre sí formando grietas de tamaño macroscópico.

A. Menou y colaboradores, en 2005 con el artículo “Residual Fracture Energy of Cement Paste, Mortar and Concrete Subject to High Temperature” [48], utilizó la metodología RILEM, para evaluar pastas, mortero y concretos a temperaturas elevadas, que van desde los 20° C hasta los 400° C, se obtuvo las características mecánicas siguientes: energía de fractura, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y parámetro de daño térmico. El parámetro de energía de fractura aumento un 50% con referencia a la energía de fractura obtenida a temperatura ambiente, concluyendo que el daño térmico (degradación debido a las altas temperaturas) puede ser uno de los principales factores que influyen la energía de fractura.

En 2008, se publicó el artículo “Fracture Roughness Scaling and its Correlation with Grain Boundary Network Structure” [49], por Bryan W. Reed et al. Este artículo se centró en el análisis de la estructura del material en relación a la rugosidad sobre una aleación con dos versiones diferentes, una convencional y una ingenieril. Se demuestra que a pesar de que ambos son la misma aleación (Base Niquel, Inconel 600) fallan de formas distintas, el material ingenieril falló más lentamente debido a su homogeneidad concluyendo además que la cualidad más relacionada con el excelente comportamiento mecánico del material no es la autoafinidad de una superficie de fractura ideal sino, más bien, las desviaciones de la autoafinidad en escalas de longitud particulares en el material real. En este artículo se comienza a analizar las relaciones entre la estructura del material y su rugosidad, abriendo así las puertas al estudio de otros materiales.

En 2014 S. Yang (2014) publicó el artículo “Correlation Between Cohesive Crack-Tip Local Fracture Energy and Peak Load in Mortar Beams” [50], el cual tiene como objetivo correlacionar la energía de fractura local con la carga máxima sobre los especímenes de mortero. Se aplica un modelo bilineal para la obtención de la curva de relajación y calcular la energía de fractura de las muestras, proponiendo un modelo trilineal para la distribución de la energía de fractura local y se concluyó con una aproximación analítica para relacionar ambos parámetros, demostrando que si existe una relación importante, gracias al modelo de la fractura ficticia y las condiciones de deformaciones compatibles en la apertura de grieta, otra de las conclusiones que se obtiene es que el efecto de tamaño es inevitable incluso si el

tamaño físico del espécimen es muy grande, la aproximación es analítica y conviene evitar la metodología compleja de elementos finitos.

J. Lee et al., en 2014 trabajaron en “An Experimental Study on Fracture Energy of Plain Concrete” [19], en el cual se realizó un estudio de fractura de energía usando el ensayo a tres puntos con un dispositivo CMOD y LVDT bajo múltiples cargas, el estudio se centra en implementar un modelo bilinear de curvas de ablandamiento para la precisión de la deformación y su distribución, con la finalidad de calcular de manera precisa la energía de fractura, comparar los resultados y buscar la posibilidad de formular una normativa para este tipo de ensayos. Se concluye que los datos obtenidos siguen siendo imprecisos, debido a la amplia cantidad de variables que existen, se necesitan una gran cantidad de estudios para definir una norma.

En 2018, P. Xu y colaboradores trabajaron en su proyecto “Fracture Energy Analysis of Concrete considering the Boundary Effect of Single-Edge Notched Beams” [51], donde estudiaron la energía de fractura afectada por el efecto de tamaño, en total evaluaron 60 vigas con diferentes tamaños para evaluar su correspondiente energía de fractura, se buscó encontrar una relación entre la energía de fractura, la energía de fractura local (calculada con un modelo bilinear) y la energía de fractura no afectada por el tamaño del espécimen ya que en el ensayo a flexión en dos puntos se consume cerca del 10% de la energía en desarrollar la zona de proceso de fractura, además el peso de la probeta influye fuertemente en los valores encontrados para la energía de fractura, para ello se evalúan diferentes tamaños, se encontró que la energía de fractura no afectada por el tamaño del espécimen en el concreto oscila entre 192-198 N/m.

En 2017, R.M. Fredizzi y colaboradores, con su estudio “Artificial carbonate rocks: synthesis and petrophysical characterization” [52], elaboraron rocas carbonatadas en base al estudio natural de estas, contribuyendo a la investigación científica dentro de las reservas de aceite y gas en el mundo, simulando una matriz natural de una roca controlando tamaño de partícula

y forma, añadiendo un material cementante que una vez mezclados, se compactan para reducir porosidad, con la finalidad de permitir acceso al estudio y correlación de las propiedades físicas de estos materiales. Se elaboró una relación entre el contenido de cemento, porosidad y permeabilidad de la roca sintética, al compararse con rocas lutita naturales carbonatadas, mostrando que la mejor dosificación logró obtener una similitud que ronda entre 20% y 30%. Aún con estos resultados, se necesita una mayor viabilidad al obtener los resultados, no se descarta ningún mejoramiento en el futuro.

En 2018, A. Varela y colaboradores publicaron el artículo “Influence of Fracture Roughness and Micro – Fracturing on the Mechanical Response of Rock Joints: a Discrete Element Approach” [4], donde se trabajó con un modelo de simulación basado en el método de elementos discretos para juntas de rocas con superficie autoafin presentando 8 modelos con diferentes valores para el coeficiente de rugosidad, longitud de correlación y varianza. Dentro de la simulación, se realizaron ensayos de compresión y cortante, concluyendo que se puede demostrar un volumen elemental de aproximadamente 1000 partículas las cuales poseen propiedades mecánicas asignadas y de esta manera modelar un comportamiento de fractura cuasi frágil que, al compararlo con los ensayos experimentales, se obtuvieron la misma magnitud. Este artículo propone una nueva metodología para estudiar la fractura con simulación, abriendo así la posibilidad de estudiar la fractura en materiales con DEM (Discrete Element Discret).

En 2019, I. Rhee y colaboradores en su publicación del artículo “Fracture Parameters of Cement Mortar with Different Structural Dimensions Under the Direct Tensión Test” [53], se obtienen las propiedades de fractura del mortero usando el ensayo de tracción directa para una barra con doble muesca, lo cual es innovador dentro del área, ya que normalmente se obtienen propiedades directamente del ensayo de tensión RILEM, se escanearon las superficies de fractura con escaneo 3D para determinar la energía de fractura de manera precisa, también se determina la longitud característica y se estudia el efecto de tamaño para todos los especímenes, ya que se obtuvieron valores fuera de lo esperado.

J. Wang y colaboradores en 2020, en su artículo “Measurements of the seismoelectric responses in a synthetic porous rock” [54], miden las respuestas sismoeléctricas en una roca porosa sintética, definiendo como tal el término de una roca sintética de acuerdo a las investigaciones que se han llevado a cabo los últimos años, demostrando que la roca sintética respondió correctamente a las señales sismoeléctricas, exhibiendo un interés científico en estudiar y elaborar rocas sintéticas con la finalidad de facilitar el estudio de la roca natural y disminuir costos de obtención. Gracias a esta y muchas otras investigaciones las rocas sintéticas ya sea elaboradas con impresora 3D o mediante moldes, se han estudiado múltiples fenómenos sobre estas con la finalidad de optimizar su composición y simular una roca natural.

Como antecedente principal a esta investigación, se recurre al artículo “Estimation of Fracture Energy from Hydraulic Fracture Tests on Mortar and Rocks at Geothermal Reservoir Temperatures” [2], publicado en 2021 por O. Rodríguez y colaboradores, la investigación está basada en especímenes de mortero y roca natural fracturados hidráulicamente mediante una bomba de presión, estas probetas poseen una cavidad en el centro, la cual atraviesa toda la probeta dejando pasar el flujo de agua, así con la bomba se ejerce presión con líquido (en este caso, aceite) hasta fracturar el espécimen, esto permitió simular un ambiente natural de fractura geológica, en el artículo se estimó la energía de fractura de las probetas y se dejó la incógnita sobre un fenómeno el cual en que la energía de fractura aumentó cuando el ensayo se elaboró a una temperatura de 100°C, esta investigación aporta al proyecto actual datos mecánicos de los materiales ensayados, además contar con las superficies de fracturas intactas contribuyendo para el análisis morfológico.

En 2022, Wei Xai y colaboradores publicaron el artículo “Study on the fracture performance for rock-concrete interface in the high geothermal tunnel environment” [55], en el cual se estudiaron experimentalmente la energía de fractura y la tenacidad a la fractura en los modos I y II (debido a que estos modos son más propensos a ocurrir en ambientes de curado a alta

temperatura). Para ello, se elaboraron probetas de roca-concreto y se realizaron ensayos de fractura mediante el método de división por cuña (*wedge splitting test*). En el estudio se analizó la longitud de propagación de la grieta y el cálculo de la energía de fractura a partir de las curvas P-CMOD. Los resultados mostraron valores de hasta 161 N/m. Asimismo, se incorporaron fibras de acero como refuerzo comparativo, demostrando un aumento significativo en la energía y la tenacidad a la fractura.

En 2022, Zhang, Z.X., publicó el artículo “Energy Requirement for Rock Breakage in Laboratory Experiments and Engineering Operations: A Review”, [56] en el cual recopiló y analizó los valores de energía de fractura reportados para distintos especímenes ensayados en laboratorio bajo diversas condiciones. Entre los resultados más destacados se encuentra la energía específica promedio de las rocas, con valores de 399 J/m³ en perforación percutiva, 131 J/m³ en corte a escala real y 157 J/m³ en perforación rotatoria. Asimismo, en el artículo se discuten los efectos de factores como el desplazamiento intergranular, la velocidad de carga, la presión de confinamiento, la medición del área superficial, la presencia de grietas prefabricadas, la abrasión y la energía térmica, destacando que todos ellos influyen directamente en la energía de fractura de la roca.

En 2025, Pathak, S. y colaboradores publicaron el artículo “Application of artificial neural network for prediction of fracture energy of concrete”, [57] en el cual se analizó la energía de fractura en el concreto, considerando parámetros como la relación agua/cemento (w/c), la resistencia a la compresión, el tamaño de los agregados y la edad de ensayo de las probetas. El estudio se llevó a cabo mediante la técnica del efecto de tamaño y un método de cómputo basado en una red neuronal artificial (ANN), utilizando probetas en forma de vigas. Los resultados mostraron una predicción precisa de la energía de fractura del concreto; sin embargo, el trabajo se centró principalmente en la implementación de nuevas tecnologías para el cálculo de este parámetro.

Capítulo IV: Motivación, Hipótesis y Objetivo

Motivación y propuesta

En la actualidad se observa una crisis global de recursos naturales, un ejemplo a escala mundial es la falta de gas natural en Europa debido al corte de suministro ocasionado por cuestiones políticas con Rusia en el año 2022, el cual fue una de las fuentes de obtención principales de gas natural que fue eliminada y que conllevó a una escasez importante para la población, problemáticas más recientes en el norte de México, el cual en años posteriores se presentó una notable falta de agua en el ambiente, actualmente existe el interés de buscar nuevos suministros de este recurso por necesidad de toda la población y evitar escasez en el futuro. Por otra parte, existe una inclinación hacia el medio ambiente, con la finalidad de aprovechar fuentes de energía renovable tales como la geotermia, optimizando su obtención o por otra parte la obtención de petróleo. Hablando de manera general, estos recursos naturales se pueden obtener mediante la excavación de pozos profundos, sin embargo, se necesitan profesionales en el campo para detectar, evaluar y excavar, puesto que, al tratarse de la corteza terrestre, no es posible perforar en cualquier sitio, ya que al perturbar las capas geológicas, pueden ocasionar derrumbes internos y, por lo tanto, terremotos.

La motivación para llevar a cabo este proyecto procede de la casi nula investigación que existe de los análisis de correlación entre la energía de fractura y la estructura interna de las rocas sintéticas y las rocas naturales. Como ya se observó en el estado del arte, algunos autores muestran interés primordial en encontrar una sustitución de las rocas naturales por rocas sintéticas [52] [54], con el objetivo principal de reducir los costos y trabajo necesario para la extracción de las mismas independientemente la profundidad a la que se encuentren en la corteza, se han empleado tanto rocas sintéticas a base de resinas, como a base de cementos naturales y artificiales, ya sean compactadas o no compactadas, así como también impresas tridimensionalmente. Gracias a la amplia investigación que existe en cuanto al mortero y concreto, se puede utilizar el estado del arte como una base sólida y fundamentada para la obtención de propiedades mecánicas que se puedan correlacionar a las propiedades de rocas naturales.

La obtención de la energía de fractura en morteros y concretos implica realizar un análisis a gran escala con el propósito de obtener resultados que reflejen la tendencia general, al basarse

en un amplio número de muestras, permitiendo así la posibilidad de obtener un resultado promedio y generalizado. y compararlo con otros materiales [46], [48], [51]. Este fenómeno depende del tamaño del espécimen y directamente de su estructura.

Se han obtenido energías de fracturas para morteros y concretos, independientemente de la dosificación, el tipo de cemento y agregado utilizado, a pesar de que han limitado el tamaño de la partícula, no se ha utilizado el método convencional para obtener la energía de fractura, abriendo la incógnita siguiente: ¿Qué valor de energía de fractura se obtendría en un mortero con una granulometría controlada con la finalidad de promover la homogeneidad en el compuesto? ¿Qué metodología y por qué sería empleada para obtener el valor de la energía de fractura?

Se han realizado experimentos comparando la energía de fractura de morteros con rocas naturales extraídas de yacimiento geotérmicos en diferentes temperaturas [2], abriendo una brecha de investigación por realizar y generando nuevas interrogantes: ¿En qué magnitud afecta la composición química del material a la energía de fractura del mismo? ¿El número de componentes del material aporta individualmente una energía de fractura específica, dando como resultado la energía de fractura global del material independiente del tamaño del espécimen? ¿La energía de fractura realizada posee una correlación entre el número de componentes y/o estructura interna? ¿Es apropiado es utilizar una roca sintética base cemento con arena de sílice como una roca sintética?

Hipótesis

En rocas sintéticas base cemento–agregados pétreos y en rocas naturales extraídas de yacimientos geotérmicos, existe una correlación directa entre la composición del material, la estructura interna y su energía de fractura.

Objetivo general

Encontrar la relación entre el número de componentes del material, la energía de fractura y su estructura interna, de las rocas sintéticas y rocas provenientes de yacimientos geotérmicos.

Objetivos específicos

- Obtener propiedades mecánicas y superficies de fractura de las rocas sintéticas y naturales.
- Calcular la energía de fractura de las rocas sintéticas a partir de la metodología RILEM.
- Analizar el comportamiento morfológico de rocas sintéticas y naturales, a partir de escaneo 3D, Microscopía Óptica, Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), así como también, determinar la principal composición química de cada una de ellas.
- Determinar la relación que existe entre el número de sus componentes, la energía de fractura y su estructura interna.

Capítulo V: Metodología

5.1 Metodología

La metodología se contemplan dos etapas fundamentales para el proyecto las cuales son:

Etapa 1.- Se proponen las dosificaciones para el desarrollo de rocas sintéticas base cemento – agregados, priorizando la homogeneidad de la roca con la finalidad de obtener propiedades mecánicas.

Etapa 2.- Elaboración, caracterización y análisis de muestras. La metodología propuesta se esquematiza en el diagrama siguiente.

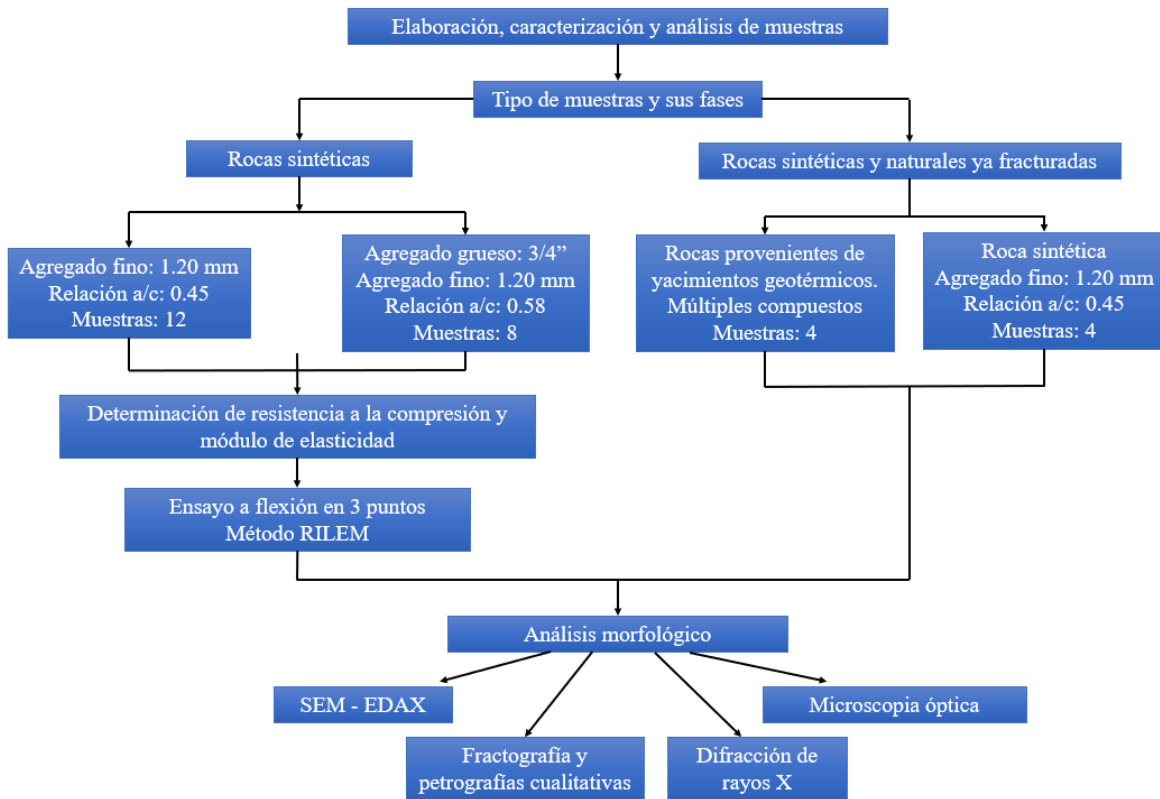


Figura 16: Esquema de metodología general propuesta.

En el proyecto, las muestras se clasifican en dos categorías: aquellas que fueron diseñadas y elaboradas específicamente para esta investigación (Rocas sintéticas), y las que fueron adquiridas directamente a partir de investigaciones previas (Rocas sintéticas y naturales ya fracturadas), específicamente de las probetas utilizadas en la investigación Estimation of

Fracture Energy from Hydraulic Fracture Tests on Mortar and Rocks at Geothermal Reservoir Temperatures elaborada por O. Rodríguez en 2021.

Las rocas sintéticas que se elaboran para esta investigación emplean distintos tamaños:

- Cemento – agregado fino, 12 probetas 4x4x16 cm.
- Cemento – agregado grueso, 4 probetas 10x10x50 cm y 4 probetas 10x10x60 cm

5.2 Material

Los materiales propuestos para el proyecto constan de probetas base cemento - agregados, siguiendo la metodología para elaborar concreto y mortero regidos por las normas ASTM-C-192-81 “Standard Practice For Making And Curing Concrete Test Specimens In The Laboratory” [58], todo esto con la finalidad de seguir una metodología establecida óptima para su elaboración, las dimensiones de las probetas dependerán de la prueba a realizar, en este caso las probetas serán fracturadas en un ensayo de flexión a 3 puntos, sin embargo para comprobar la resistencia a la compresión de la rocas sintéticas, son necesario moldes cilíndricos y cubos.

Se utilizan probetas base cemento – agregado fino fracturadas hidráulicamente, las rocas fueron extraídas del Valle de Querétaro [59] y utilizadas para la investigación del artículo “Estimation of Fracture Energy from Hydraulic Fracture Tests on Mortar and Rocks at Geothermal Reservoir Temperatures” de las cuales fueron cuidadosamente almacenadas y cuentan con las siguientes especificaciones: Moldes cilíndricos con diámetro externo de 53 mm y 10 mm de diámetro interior con altura de 105 mm, tamaño de partícula de 1.40 mm con una proporción A/C de 0.45 curado a los 28 días. Así mismo existen probetas de rocas naturales con las mismas dimensiones. [2]

5.3 Probetas

Rocas sintéticas base cemento – agregado fino: ASTM C348, se utilizaron moldes de 4x4x16 cm, se elaboraron con una dosificación para las probetas con 1.20 cm de tamaño de partícula, con una relación agua cemento de 0.45, elaborado con cemento Portland CPC 30

R. Se elaboraron un total de 12 probetas prismáticas rectangulares para el ensayo RILEM, de las cuales 8 son curadas por inmersión y 4 curadas por aspersores con un ambiente 100% de humedad, también se elaboraron 3 probetas cúbicas para el ensayo a compresión (ASTM C109/C109 M). Para la determinación del módulo de elasticidad, se elaboraron 3 probetas cilíndricas ensayadas con ayuda de un extensómetro de acuerdo a la norma ASTM C469-02. [60]–[62].

Dosificación: Para la dosificación de la roca sintética, se elaboran para 1 Lt de pre-mezcla.

Tabla 4: Dosificación para la roca sintética base cemento - agregado fino.

Roca Sintética		
Cemento (kg)	Agregado Fino (kg)	Agua (kg)
0.68	1.552	0.306

Probetas base cemento – agregado fino y grueso: De acuerdo a la norma ASTM C192/C192M-02 se elaboraron 5 probetas cilíndricas de 10 cm diámetro y 20 cm de altura, para pruebas de resistencia a la compresión de acuerdo a la norma ASTM C39/C39M-09a. La dosificación posee un tamaño de la partícula con 1.20 mm para agregado fino y agregado grueso de 19 mm (3/4”), elaborado con cemento Portland CPC 30 R, cuya relación agua-cemento es 0.58. Para ensayo RILEM se elaboran 4 probetas prismáticas rectangulares con medidas 15x15x50 cm y 4 probetas 15x15x60cm, se elaboran de acuerdo a la norma para el ensayo a flexión ASTM C293-08 siguiendo la recomendación RILEM. [58], [63], [64].

Dosificación: Para la dosificación se elaboran 25 Lt, la dosificación se elaboró de acuerdo al método de volumen absoluto [22].

Tabla 5: Dosificación para la roca sintética base cemento - agregado fino y grueso.

Material	Agregados kg/m ³	Agregados por 25 lt	Humedad	Proporciones en kg
Cemento	372	9.31	0	9.31
Agregado fino	720	17.99	0.30	18.30
Agregado grueso	1007.5	25.1875	0.13	25.31
Agua	216	5.4	0.43	5.83
Total	2316	57.89	0	57.89

Se elaboró una dosificación en vista a una resistencia de 30 MPa.



Figura 17: Se muestra el proceso de elaboración de probetas de concreto.

Se cribó el agregado fino para limitar el tamaño de partícula, se cribaron 10.98 kg de arena para la mezcla según la dosificación. El tamaño del grano pasó la malla 20, es decir 1.20 mm de apertura. Además el agregado grueso tuvo un tamaño máximo de 20 mm, pasando la malla 3/4". Se buscó un revenimiento entre 7.5 y 10 cm, para mejorar la trabajabilidad y asegurar una mezcla homogénea facilitando la elaboración de las probetas.

La mezcla se elaboró de acuerdo a la norma ASTM C192/C192M-02 [58], se humedeció la revoladora y posteriormente se añadieron los agregados junto con 1/3 de la mitad del agua, se mezclaron durante un minuto, después se añadió el cemento completo y el agua sobrante, se mezclaron durante tres minutos. Luego de la mezcla, se dejó reposar dos minutos tapando con una manta para que la humedad ambiental no afecte la mezcla y finalmente se revolvió dos minutos más. La mezcla cumplió con especificaciones de trabajabilidad, con un revenimiento de 10 cm, la práctica se realizó con respecto a la norma ASTM C143/C143M-12 [65].

5.4 Ensayos de prueba materia prima

Como fines de calidad, se aplicaron las siguientes normativas con el fin de recabar variables utilizadas para la correcta dosificación de la mezcla con base a las normas ASTM, las cuales son las siguientes:

- Granulometría: ASTM C136/C136M-14, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates". [66]
- Peso Volumétrico Seco Varillado Agregado Grueso: ASTM C-29-91a, "Standard Method for Test for Unitweight of Aggregate". [67]

- Densidad y Absorción Agregado Fino: ASTM C128-12, “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate”. [68]
- Densidad y Absorción Agregado Grueso: ASTM C127-07, “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate”. [69]
- Revenimiento: ASTM-C-143-05 “Slump of Portland cement concrete”. [65]

5.5 Ensayos mecánicos

Cilindros para prueba a compresión: Para la roca sintética base cemento – agregados finos y grueso se realizaron 5 cilindros con la finalidad de obtener datos complementarios sobre el material, los cuales son: resistencia a la compresión en base a la norma ASTM-C39/C39M-09a [63] y módulo de elasticidad, además para las rocas sintéticas base cemento – agregado fino se realizó la prueba a compresión en base a la norma ASTM-C 109/C109M-99 [61].



Figura 18: Cilindros para determinar resistencia a la compresión y módulo de elasticidad de las rocas sintéticas base cemento – agregado grueso.

Los cilindros se curaron a los 28 días, posteriormente se agregó el aditamento requerido para obtener el módulo de elasticidad, el deformímetro mide la deformación diametral del espécimen que a su vez nos da información para obtener la deformación unitaria, el cual es la división, la fórmula para obtenerla es la siguiente:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (17)$$

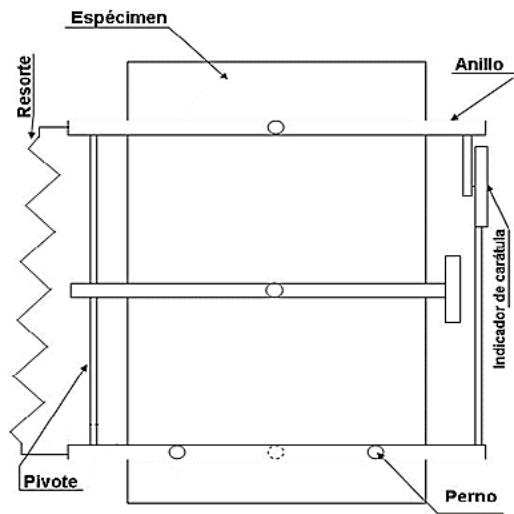


Figura 19: Diagrama del extensómetro, proporciona los datos necesarios para calcular el módulo de elasticidad del concreto.

Las probetas son ensayadas en base a la norma ASTM C 469-02 [62], donde a través de la fórmula 18 se determina el módulo de elasticidad.

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(e_2 - 0,000050)} \quad (18)$$

Donde E es el modulo de elasticidad en (kg/cm^2) , S_1 es el esfuerzo en kg/cm^2 en la deformación unitaria 0,000050 y S_2 es 40% del esfuerzo máximo, e_2 corresponde a la deformación unitaria al 40% del esfuerzo máximo.

Una vez que se determinaron las deformaciones, se ensayaron los cilindros hasta su ruptura. Para el cálculo de la resistencia a la compresión, se utiliza la formula

$$f'_c = \frac{F}{A} \quad (19)$$

Donde F es la carga máxima en kg que resistió la probeta al momento del ensayo, y A es el área en cm^2 .

Probetas para prueba a tensión: La recomendación RILEM para el cálculo de energía de fractura menciona el uso de un ensayo a flexión a tres puntos [30], la elaboración de las

probetas se basó en la norma ASTM C192/C192M-02 [58] y el ensayo a tensión está basada en la norma ASTM C293-08 [64] y ASTM C348-08 [60], todo con la finalidad de controlar la metodología de acuerdo a parámetros ya establecidos y optimizados.



Figura 20: Elaboración y ensayo de probetas base cemento – agregados finos y gruesos de acuerdo a la normativa.

Las probetas son ensayadas para determinar la carga máxima, de acuerdo con la recomendación RILEM, para determinar la energía de fractura es recomendado elaborar una muesca al medio, con una profundidad de acuerdo con las dimensiones de la probeta. Sin embargo, no es obligatorio, en esta ocasión no se realiza esta muesca. La unidad de ensayos es una INSTRON 600DX para probetas con medidas de 10x10x50 cm y 10x10x60 cm, para las probetas pequeñas, 4x4x16 cm se utiliza una máquina a compresión ELE Internacional modelo 1913B0001 con un flujo de carga estandarizado de acuerdo con la normativa.



Figura 21: Elaboración de probetas y ensayos para roca sintética base cemento - agregado fino.

Obtención del módulo de Weibull: Este método estadístico proporciona información de estadística en cuanto a la variabilidad del material, en este caso, se cuantifica cuando las rocas fallan bajo un nivel de carga a tensión en 3 puntos, reflejando la distribución de los tamaños de las imperfecciones. Se asigna un rango numérico 1 asignándole a la probeta con menor resistencia, en total son 4 probetas en el primero y los últimos dos casos y 8 en el segundo caso, dividiendo la probabilidad entre $n+1$ del total de las probetas, para la gráfica, se traza $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-p} \right) \right]$ en función de la resistencia.

5.6 Caracterización microestructural

De acuerdo al tetraedro de la ciencia de los materiales, los aspectos primordiales en la ciencia se reflejan el desempeño, propiedades, procesamiento y estructura, este último se basa principalmente en la estructura interna del material definida principalmente de acuerdo al tipo, cantidad, tamaño, forma y distribución de las fases presentes en él, en el caso de una roca sintética base cemento – agregados pétreos, están constituidos de múltiples fases distribuidas heterogéneamente.

Es importante tener en cuenta que los componentes están constituidos por fases cristalinas, poros y sistemas de microgrietas, mientras que la matriz de cemento está repleta de silicatos hidratados y cristales, estas fases se encuentran en constante cambio al momento del curado, es por ello por lo que la resistencia del concreto y mortero varían con respecto a la edad de curado, siendo 28 días lo óptimo para alcanzar las propiedades esperadas.

Se caracteriza la microestructura con microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido.

5.6.1 Preparación de muestras para caracterización microestructural

Utilizando un martillo, se obtienen pequeños trozos del material, lo más cercano al centro de la probeta para evitar obtener zonas carbonatadas e inferir en la determinación de la composición química del material.

Los fragmentos de concreto se montaron en resina en frío, posteriormente se pulieron con lijas de números 60, 120, 400, 500, 600 y 1200, con la finalidad de someterlos al microscopio óptico y electrónico de barrido. No fue necesario utilizar un recubrimiento con oro para el análisis en el microscopio electrónico de barrido en esta ocasión ya que el detector principal se basa en electrones secundarios en el equipo Hitachi SU8020.

5.6.2 Difracción de rayos X

Con la finalidad de obtener las fases y composición química del material, se llevó a cabo el estudio por difracción de rayos X, dicha caracterización se llevó a cabo bajo los siguientes parámetros: fuente de radiación de Co K ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) producidos con 50 kV y 40 mA. Las mediciones se llevaron a cabo en un rango de 5° a 80° como rango recomendado por el estado del arte, a una velocidad de 0.02°/min. Para la interpretación de resultados se utilizó el programa Macth3!, el cual nos proporciona las reflexiones HKL característica en ciertos ángulos, dichas reflexiones corresponden a lo esperado del material, basado en el análisis químico fundamental en el EDS, y el estado del arte. Se espera en el caso de la roca natural contar con una gran cantidad de fases amorfas las cuales son muy comunes de las rocas volcánicas y provenientes de los yacimientos geotérmicos.

Capítulo VI: Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados de la investigación comenzando por las pruebas mecánicas, posteriormente se presentan resultados calculados para la energía de fractura, caracterización morfológica superficial en microscopio óptico y electrónico de barrido, así como también la determinación de sus componentes elementales en la espectroscopia de rayos X de energía dispersiva y difracción de rayos X.

6.1 Pruebas mecánicas

6.1.1 Ensayo de compresión

En la figura 25, se muestran los resultados obtenidos para los ensayos a compresión para rocas sintéticas base cemento – agregados finos (C.AF) y base cemento – agregados finos y gruesos (C.AFG).

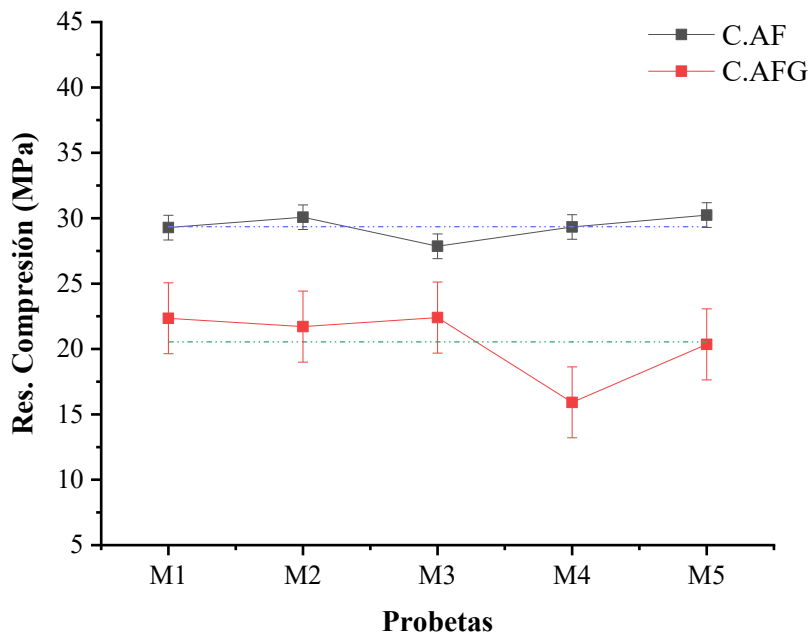


Figura 22: Resultado de ensayos a compresión para las rocas sintéticas, la línea negra con puntos triangulares son los resultados para rocas sintéticas base cemento - agregados finos, mientras que la línea roja con puntos cuadrados es para la roca sintética base cemento – agregados finos y gruesos.

Los resultados vistos en la grafica corresponden a lo esperado de acuerdo con la composición de cada grupo de probetas ensayadas, la integración de agregado grueso a la probeta,

promovió las inclusiones y heterogeneidad en el material, demostrando un bajo valor para la resistencia a la compresión a comparación del que posee únicamente agregado fino, el tamaño de la partícula limitado incentivó la homogeneidad y por lo tanto un mejoramiento en la resistencia a la compresión, una de las razones principales por los cuales sucede esto, es que para C.AF se utilizó una relación a/c de 0.45, mientras que para C.AFG se utilizó a/c = 0.58 por razones de trabajabilidad al momento de elaborar las probetas. En esta ocasión se evitó el uso de aditivos, sin embargo, no está descartado para futuras investigaciones usando una relación a/c = 0.45 en ambos tipos de rocas sintéticas.

Para el módulo de elasticidad se obtuvieron los siguientes valores promedio

Tabla 6: Módulo de elasticidad promedio de rocas sintéticas y rocas naturales.

Rocas Sintéticas	Módulo de elasticidad (GPa)
Cemento – Agregados gruesos y finos (C.AFG)	15.47 ± 0.59
Cemento – Agregados finos (C.AF)	13.97 ± 0.32
Roca natural [2]	24.98

En la tabla anterior se compara el módulo de elasticidad entre las rocas sintéticas y naturales, se observa que la presencia de agregados finos da menor rigidez al material ya que los agregados suelen ser material de relleno que disminuyen el módulo de elasticidad, entre más pequeño sea la partícula del agregado pétreo, menos contribuye y es por eso por lo que C.AF posee menor módulo de elasticidad. En el caso de la roca natural, posee un módulo de elasticidad mayor debido a su propia estructura, al estar más densa y compacta, volviéndola más rígida, así mismo su porosidad es mucho más baja, además de su composición mineralógica, al ser una roca natural posee estructuras cristalinas, en su mayoría rígidas que individualmente aportan a la estructura mayor rigidez.

6.1.2 Ensayo de tensión

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos a tensión, donde se observan las siguientes nomenclaturas, MR es para roca sintética C.AF, al tratarse de un cemento, se sometió a un curado durante 28 días, en este caso fue una cámara de curado con 100% de

humedad, las rocas sintéticas 0 R y R también del tipo C.AF, sin embargo, el método de curado es sumergido en agua a temperatura ambiente.

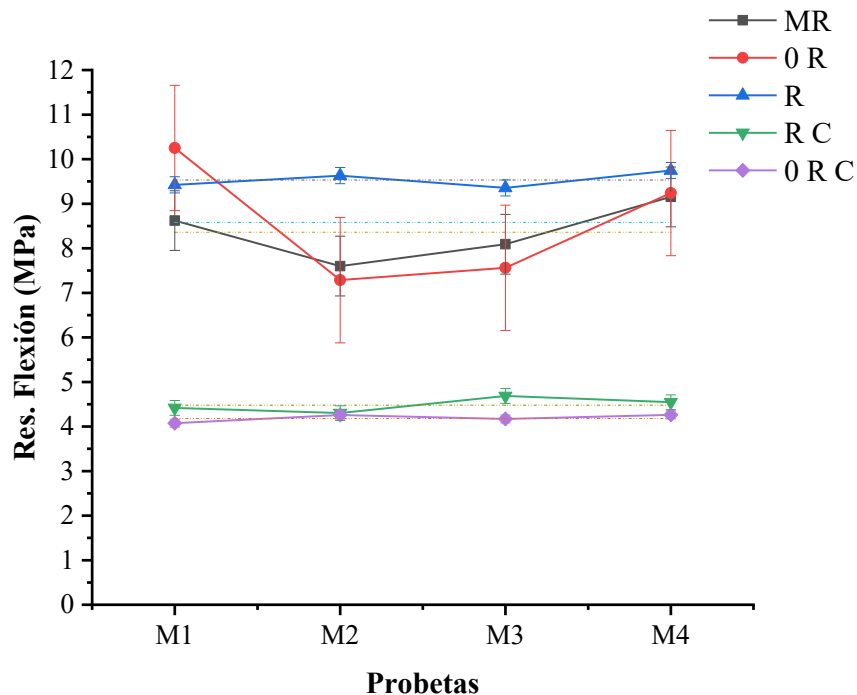


Figura 23: Resultados de resistencia a la flexión para las rocas sintéticas, línea negra, roja y azul son rocas sintéticas C.AF mientras que la línea morada y verde son rocas sintéticas C.AFG.

La grafica muestra valores de resistencia a la flexión altos para las rocas sintéticas C.AF curadas con inmersión en agua y curado por aspersores con 100% de humedad, estos son MR, 0 R, R de la gráfica, mostraron una resistencia increíblemente alta debido a la formación de estructuras cristalinas fomentando la homogeneidad en comparación a las rocas sintéticas tipo C.AFG que son los R C y 0 R C ya que poseen un agregado de mayor tamaño nominal aumentando la probabilidad de falla a flexión, así como también fueron elaboradas en base a una relación a/c más alta que el otro tipo de roca sintética.

6.1.3 Curvas carga - desplazamiento

Para el cálculo de la deflexión máxima se utiliza el programa Pybar, el cuál es capaz de calcular la deflexión de un material en cada carga de acuerdo a su sección, específicamente en vigas y armaduras, todo esto en base a propiedades del material base, para ello se requieren

datos específicos y son enlistados en la tabla 7, así mismo también es posible calcular la deflexión última con un modelo matemático bilineal, sin embargo los resultados obtenidos son comparables a un sensor CMOD utilizado normalmente para la medición de deflexiones últimas en vigas.

Tabla 7: Datos necesarios para calcular la deflexión en cada punto con el programa Pybar.

Dato	Unidad
Carga máxima	(N)
Longitud de la probeta	(mm)
Momento de inercia	(mm ⁴)
Módulo de elasticidad	GPa

Se obtuvieron las curvas carga desplazamiento para rocas sintéticas C.AF mostradas en la fig. 27.

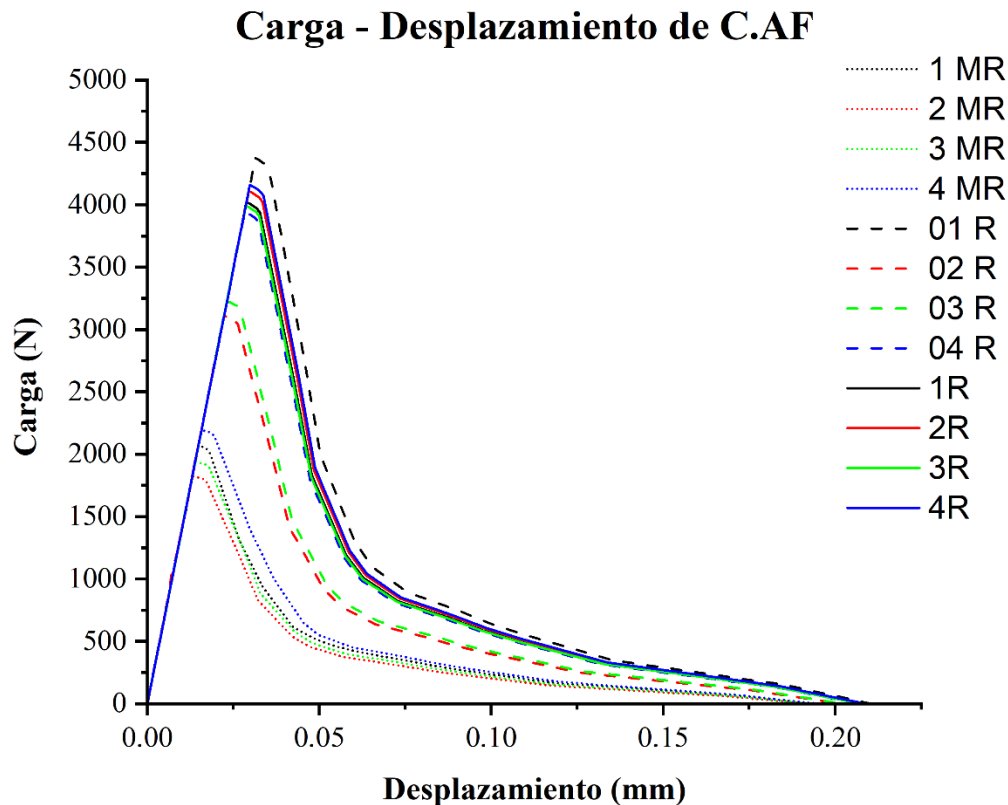


Figura 24: Gráfica carga - desplazamiento de rocas sintéticas base cemento - agregado fino donde se observan las siguientes nomenclaturas MR para rocas sintéticas curadas por aspersion en un ambiente 100% de humedad, 0 R y R son rocas sintéticas curadas bajo inmersión en agua a 20° C.

La figura 27 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de flexión, se observa la carga contra el desplazamiento obtenido para cada roca sintética, el cálculo del desplazamiento máximo se realizó de acuerdo con el programa Pybar, el cual calculó el ángulo de apertura y desplazamiento máximo de acuerdo con características del material. Las probetas MR poseen una curva más pequeña debido a su sección, cuya dimensión es rectangular 4x3 cm.

Se obtuvieron las curvas carga desplazamiento para rocas sintéticas base cemento – agregado fino y grueso, que se muestran en la fig. 28.

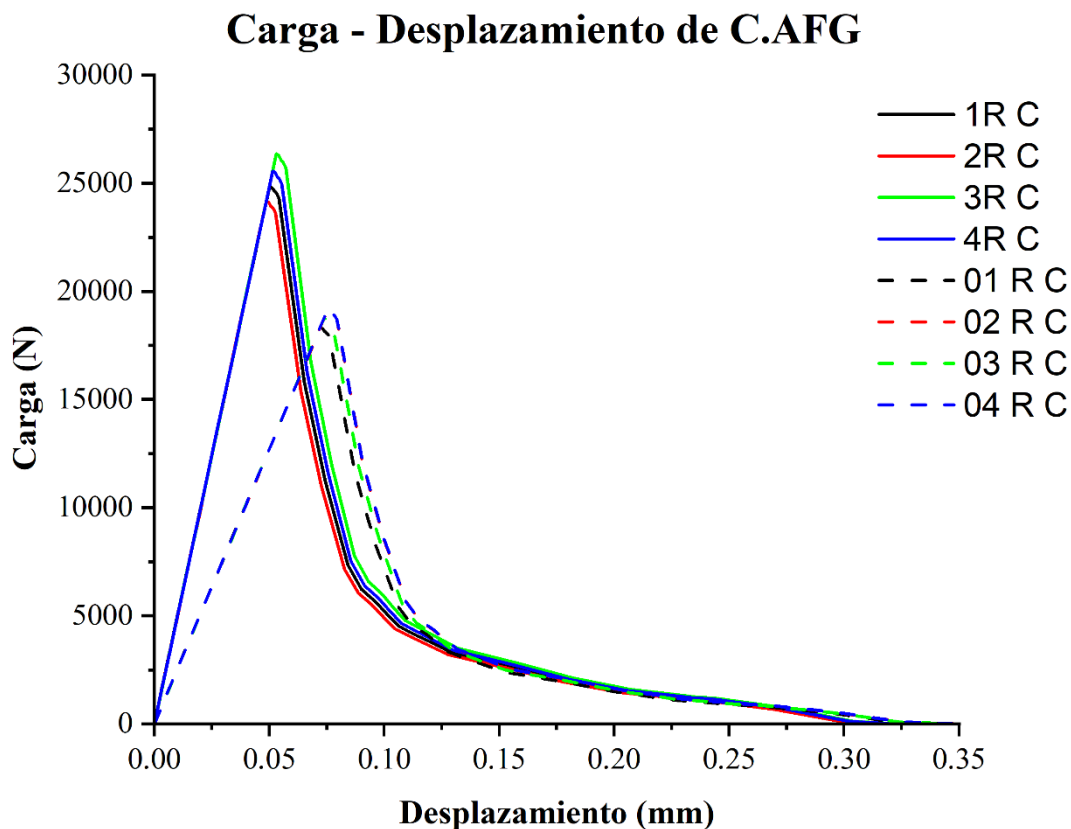


Figura 25: Gráfica Carga – desplazamiento de rocas sintéticas base cemento – agregado fino y grueso, se observan las nomenclaturas R C y 0 R C, la cual R C son rocas sintéticas con dimensiones 15x15x50 cm, mientras que las rocas 0 R C poseen dimensiones 15x15x60 cm, es por ello por lo que la carga máxima disminuye considerablemente.

La figura 28 muestra una discrepancia en las cargas máximas soportadas por el mismo tipo de roca sintética, sin embargo, la dimensión aumenta considerablemente la masa de la probeta generando cargas que promueven con más facilidad la fractura a menos carga. Sin embargo,

las cargas soportadas siguen siendo considerablemente altas teniendo en cuenta el tamaño de partícula de los agregados finos, además se aprecia que no existe gran tasa de variación entre ellos, demostrando que el procedimiento de elaboración de roca sintética fue correcto.

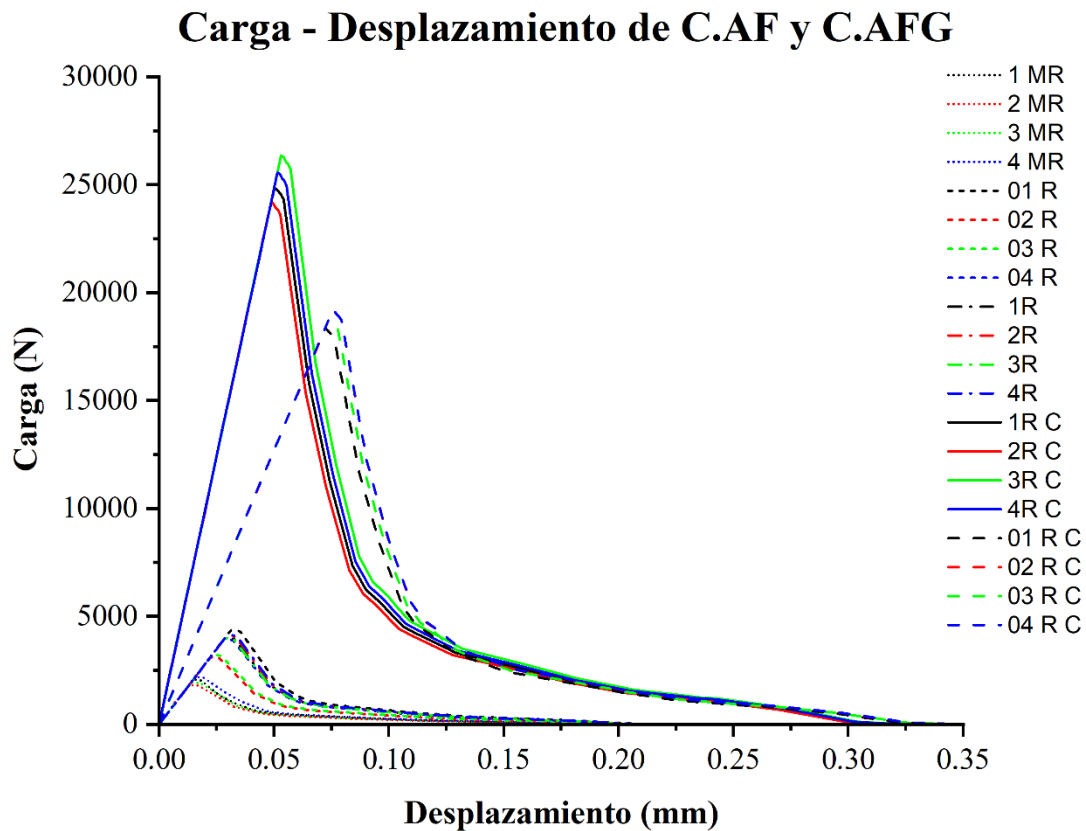


Figura 26: Comparativa global de la gráfica carga desplazamiento para los tipos de rocas sintéticas, las rocas con nomenclatura MR, 0 R y R son del tipo C.AF (cemento - agregado fino) y las rocas con nomenclatura R C y 0 R C pertenecen al grupo C.AFG (cemento – agregado grueso).

Como se observa en la figura 29, las cargas máximas de las rocas sintéticas varían de acuerdo con el tipo de roca, ya sea C.AF o C.AFG, ya que cada una se realizó con diferentes dimensiones y su sección cambia, influyendo directamente en la carga y desplazamiento máximos.

6.1.4 Módulo de Weibull

Los resultados para el cálculo de módulo de Weibull se presentan en tabla 8 para cada uno de los tipos de rocas sintéticas,

Tabla 8: Cálculos de probabilidad de falla acumulada en función al esfuerzo a tensión del material.

Probeta	Probabilidad	$(1/1 - P)$	$Ln[ln(1/1 - p)]$	Resistencia flexión (MPa)
2 MR	1/5	1.25	-1.49	7.60
3 MR	2/5	1.66	-0.67	8.09
1 MR	3/5	2.5	-0.08	8.62
4 MR	4/5	5	0.47	9.15

Probeta	Probabilidad	$(1/1 - P)$	$Ln[ln(1/1 - p)]$	Resistencia flexión (MPa)
02 R	1/9	1.12	-2.13	7.28
03 R	2/9	1.28	-1.38	7.56
04 R	3/9	1.5	-0.90	9.23
3 R	4/9	1.8	-0.53	9.35
1 R	5/9	2.25	-0.20	9.42
2 R	6/9	3	0.09	9.63
4 R	7/9	4.5	0.40	9.74
01 R	8/9	9	0.78	10.25

Probeta	Probabilidad	$(1/1 - P)$	$Ln[ln(1/1 - p)]$	Resistencia flexión (MPa)
2R C	1/5	1.25	-1.49	4.30
1R C	2/5	1.66	-0.67	4.41
4R C	3/5	2.5	-0.08	4.54
3R C	4/5	5	0.47	4.68

Probeta	Probabilidad	$(1/1 - P)$	$Ln[ln(1/1 - p)]$	Resistencia flexión (MPa)
01 R C	1/5	1.25	-1.49	4.07
03 R C	2/5	1.66	-0.67	4.16
02 R C	3/5	2.5	-0.08	4.25
04 R C	4/5	5	0.47	4.26

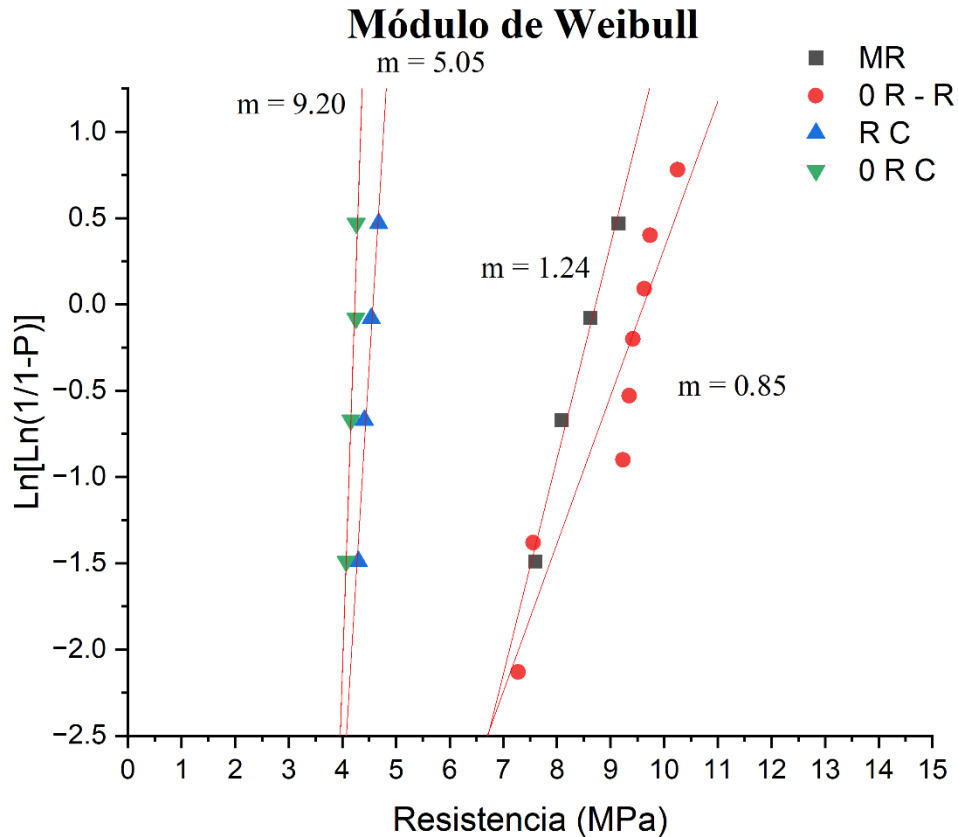


Figura 27: Gráfica de probabilidad de falla acumulada en función al esfuerzo.

La figura 30 muestra la gráfica de distribución de Weibull para las rocas sintéticas, con una pendiente de 9.20 para 0 R C y 5.05 para R C, estas rocas son del tipo C.AFG, mostrando menor variabilidad en los resultados, demostrando que poseen menor distribución de imperfecciones que el otro grupo, el grupo C.AF las cuales su nomenclatura es MR y 0 R – R, y tiene una pendiente de 1.24 y 0.85. Concluyendo que existe una distribución más heterogénea de las imperfecciones por parte del grupo base cemento - agregado fino, más adelante se puede relacionar con el parámetro de longitud característica.

6.1.5 Energía de fractura

A partir de las gráficas de la figura 30, se puede calcular la energía de fractura calculando el área bajo la curva de cada una de ellas, posteriormente se utiliza la ecuación 15, para estimar la energía de fractura. Los resultados de cada probeta se presentan en la tabla 9 para rocas

sintéticas tipo C.AF (base cemento – agregado fino) y la tabla 10 para C.AFG (base cemento – agregado fino y grueso).

Tabla 9: Energía de fractura en cemento - agregado fino.

C.AF	Energía de fractura G_f (J/m ²)	Promedio por grupos G_f (J/m ²)	Promedio General G_f (J/m ²)
1 MR	84.32		
2 MR	74.59		
3 MR	80.03	83.07 ± 7.92	
4 MR	93.36		
01 R	135.98		
02 R	88.03		
03 R	92.05	108.71 ± 22.73	105.15 ± 21.61
04 R	118.79		
1 R	121.69		
2 R	125.33		
3 R	120.56	123.68 ± 3.07	
4 R	127.14		

Tabla 10: Energía de fractura en cemento - agregado fino y grueso.

C.AFG	Energía de fractura G_f (J/m ²)	Promedio por grupos G_f (J/m ²)	Promedio General G_f (J/m ²)
1R C	172.70		
2R C	166.30		
3R C	186.32	176.04 ± 8.55	
4R C	178.87		
01 R C	151.33		166.67 ± 11.86
02 R C	160.78		
03 R C	156.15	157.29 ± 4.55	
04 R C	160.91		

La energía necesaria para fracturar a un material se le conoce como energía de fractura, como se observa en la tabla 9, la energía de fractura para una roca sintética base cemento – agregado fino va en orden de 74.59 a 135.98 J/m², siendo Joules la medida para representar la energía

sobre cada metro cuadrado, este rango ha sido encontrado en la literatura [2], [23], y para una roca sintética base cemento – agregado fino y grueso, es de un orden mayor, siendo entre 151.33 a 186.32 J/m² correspondiente a valores arrojados por la literatura [46], [48], [51], cabe destacar que la desviación estándar de estos valores es alta, siendo para las rocas tipo C.AF un valor 21.61 J/m² en la tabla 9 y las rocas tipo C.AFG teniendo una desviación estándar de 11.86 J/m² en la tabla 10, es decir, existe una amplia dispersión de los valores alejados de la media principalmente para la tabla 9, reflejando alto nivel de heterogeneidades y posibles sensibilidad a cambios o influencias externas ajenas al cálculo de la energía de fractura por el método RILEM (ej. área real de fractura, deflexión real, efecto de tamaño), de esta manera se puede observar que la recomendación RILEM si bien es una metodología utilizada ampliamente en la rama de la mecánica de fractura, aún se encuentra en constante evaluación y estudio, ya que no ha sido formalmente adoptada como una normativa debido a su confiabilidad y coherencia en resultados a nivel global desde su creación, incitando al uso de otras metodologías [31].

Tabla 11: Resultados obtenidos a partir de fractura hidráulica para morteros.

Mortero	Energía de Fractura G_f (J/m²)
1	84.32
2	74.59
3	80.03
4	127.14

Tabla 12:: Resultados obtenidos a partir de fractura hidráulica para rocas naturales a temperatura ambiente 20° C y 100° C.

Roca Natural	Energía de Fractura G_f (J/m²)
20° C	213.5
100° C	258.7

Como se puede observar, en la tabla 11, la energía de fractura calculada a partir de fractura hidráulica en especímenes de mortero cuya composición es similar a las rocas sintéticas base

cemento – agregado fino, obtiene valores cercanos a los recabados en esta investigación, cabe destacar que la composición y dosificación es completamente la misma, variando únicamente la composición química de los agregados finos, sin embargo los datos obtenidos y caracterización mecánica corresponden coherentemente a lo reportado. En la tabla 12 se puede observar la energía de fractura obtenido por fractura hidráulica de una roca natural, se observa que los valores son mucho más altos para una roca natural que para una roca sintética, promediando los resultados de energía de fractura, se obtiene un total de $105.15 J/m^2$ obtenidos para esta investigación y $213.5 J/m^2$ para rocas naturales, existiendo una diferencia de $108.34 J/m^2$ equivalente al 103%.

6.1.5 Longitud característica

La longitud característica permite obtener la zona de disipación de la energía de fractura del material, en este caso de las rocas sintéticas, teniendo en cuenta variables tal como la energía de fractura, módulo de elasticidad y resistencia, en este caso, resistencia a la flexión, se utilizó la ecuación 16 en la que se obtuvieron los datos siguientes.

Tabla 13: Longitud característica de las rocas sintéticas base cemento - agregado fino.

C.AF	Longitud Característica (mm)	Promedio por grupos (mm)	Promedio General (mm)
1 MR	17.55		
2 MR	19.97		
3 MR	18.91		
4 MR	17.25		
01 R	20.01		
02 R	25.65		
03 R	24.90		
04 R	21.52		
1 R	21.19		
2 R	20.90		
3 R	21.31		
4 R	20.70		
		18.42 ± 1.58	
		23.02 ± 2.69	20.82 ± 2.51
		21.02 ± 0.27	

Tabla 14: Longitud característica de las rocas sintéticas base cemento – agregado fino y grueso.

C.AFG	Longitud Característica (mm)	Promedio por grupos (mm)	Promedio General (mm)
1R C	123.61		
2R C	125.58	122.16 ± 3.08	
3R C	118.51		
4R C	120.95		123.64 ± 2.78
01 R C	127.29		
02 R C	123.86	125.12 ± 1.64	
03 R C	125.50		
04 R C	123.83		

Como se observa en la tabla 1, poseer una longitud característica pequeña tal como en el caso de las rocas sintéticas MR, demuestra que las fisuras y grietas tienden a propagarse en distancias más cortas, disipándose la energía de fractura en zonas más pequeñas, interpretando que existe un mayor grado de heterogeneidad en aquellas probetas con valores más bajos, lo cual se refleja a su vez con la energía de fractura que posee, por otro lado en la tabla 14, se observa que la longitud característica es más grande, tendiendo a una mayor capacidad de disipar energía a distancias más largas sin que las fisuras se propaguen significativamente, se correlaciona directamente a la energía de fractura que posee, ya que de igual manera es mayor en las probetas C.AFG que las probetas C.AF.

6.2 Análisis morfológico

6.2.1 Fractografía cualitativa

En la fractografía cualitativa, se tomaron fotografías de dos superficies de fractura en las rocas sintéticas tipo C.AFG. con la finalidad de observar los patrones de fractura ocasionados durante el ensayo de flexión a tres puntos de la muestra.



Figura 28: Fotografía de dos superficies de fractura en las rocas sintéticas tipo C.AFG, se utilizó este tipo de roca sintética debido a la facilidad con la que se puede apreciar los fenómenos de fractura.

En la figura 31 se puede observar la fractura de dos rocas sintéticas, en donde se presenta una fractura transgranular en la que ocurre el desprendimiento de los agregados. El comportamiento cuasi frágil se observa al momento en el que el concreto se encuentra cerca de su capacidad de carga máxima, los agregados juegan un papel importante ya que al estar unidos por una matriz de cemento, forman una red sólida, al llegar una carga, los esfuerzos se transmiten a través de la matriz de la pasta y los agregados. En condiciones normales, la matriz de la pasta se deforma y redistribuye los esfuerzos, absorbiendo la carga antes de la falla, durante este fenómeno, el material se considera dúctil, sin embargo en este material base cemento, la matriz al estar sometida a la capacidad máxima, puede ocurrir un comportamiento cuasi frágil, sin recurrir al comportamiento dúctil, propagando la formación de fisuras en la matriz de la pasta y la interacción entre las fisuras y los agregados, experimentando la falla repentina y sin capacidad de absorber energía.

En algunos casos se puede apreciar claramente el desprendimiento de los agregados, y la dirección de la falla como en la figura 32:

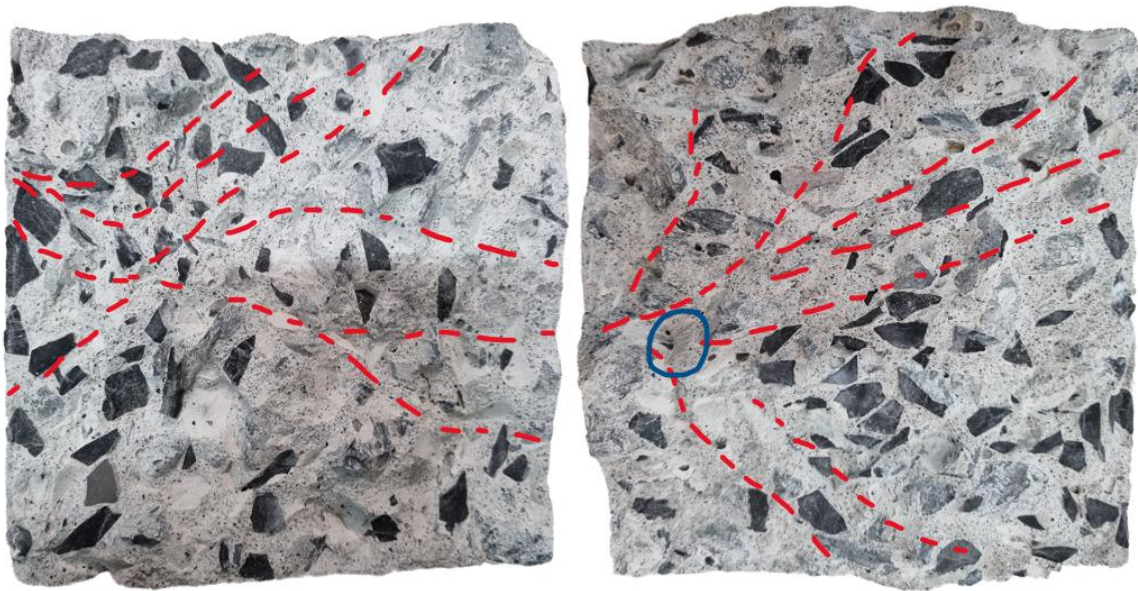


Figura 29: Imagen de la superficie de fractura del concreto, se puede observar la dirección de la falla en las rocas sintéticas C.AFG. en color rojo, en color azul se puede observar el patrón tipo de una fractura frágil.

En el círculo azul de la figura 32, se puede apreciar la zona plana de una fractura y su correspondiente zona fibrosa con patrones conocidos como marcas de río.

6.2.2 Microscopía óptica

En las figuras 33 y 34 se presentan algunas imágenes de las muestras obtenidas en el microscopio óptico con ampliificaciones de 5x y 100x en campo claro.

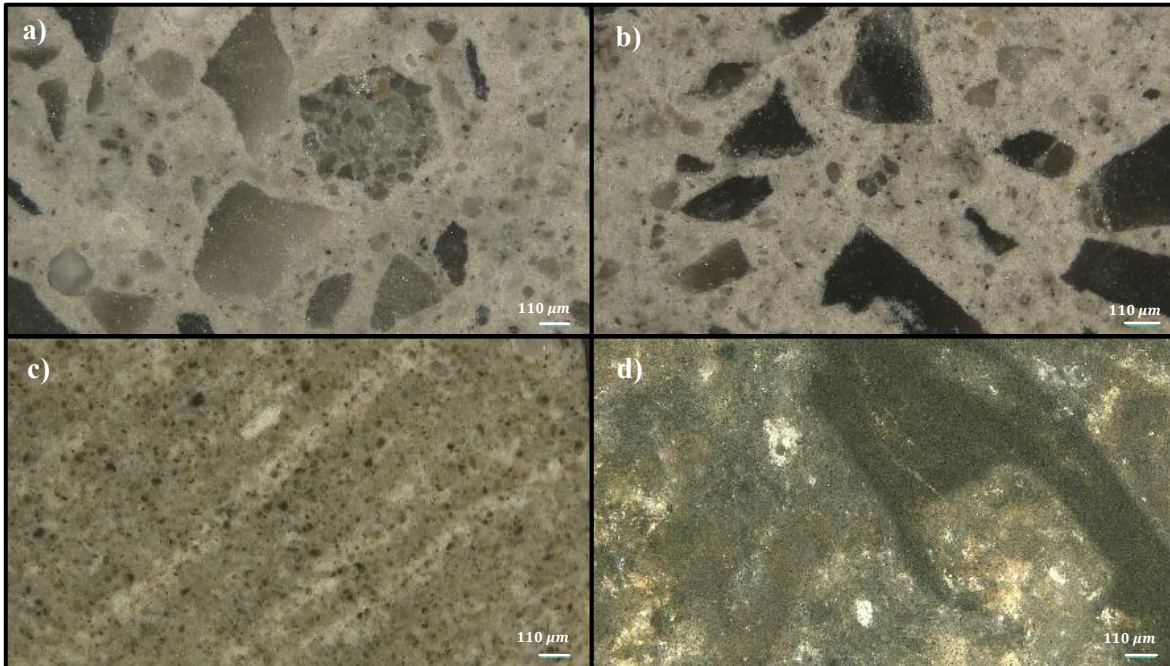


Figura 30: Microscopía óptica x5 a) Roca sintética C.AF, b) Roca sintética C.AFG, c) Roca Natural expuesta a 100° C, d) Roca Natural a temperatura ambiente.

La figura 33 (a), muestra la imagen de una roca sintética del tipo C.AF en un microscopio óptico a 5x, en ella se puede observar la presencia de porosidad con apariencia circular, con un diámetro aproximado de 150 μm , se puede apreciar tanto como (a) como en (b) una distribución irregular de los agregados así como el tamaño de los mismos, sin embargo, tanto en (c) como en (d), se puede apreciar una homogeneidad mayor y un tamaño de partícula mucho más pequeña que en las rocas sintéticas, de igual manera, la superficie observada de las rocas naturales se diferencia por mucho a las rocas sintéticas, esto debido a su formación natural gracias a las altas presiones y temperaturas a las que son expuestas, generando esta morfología.

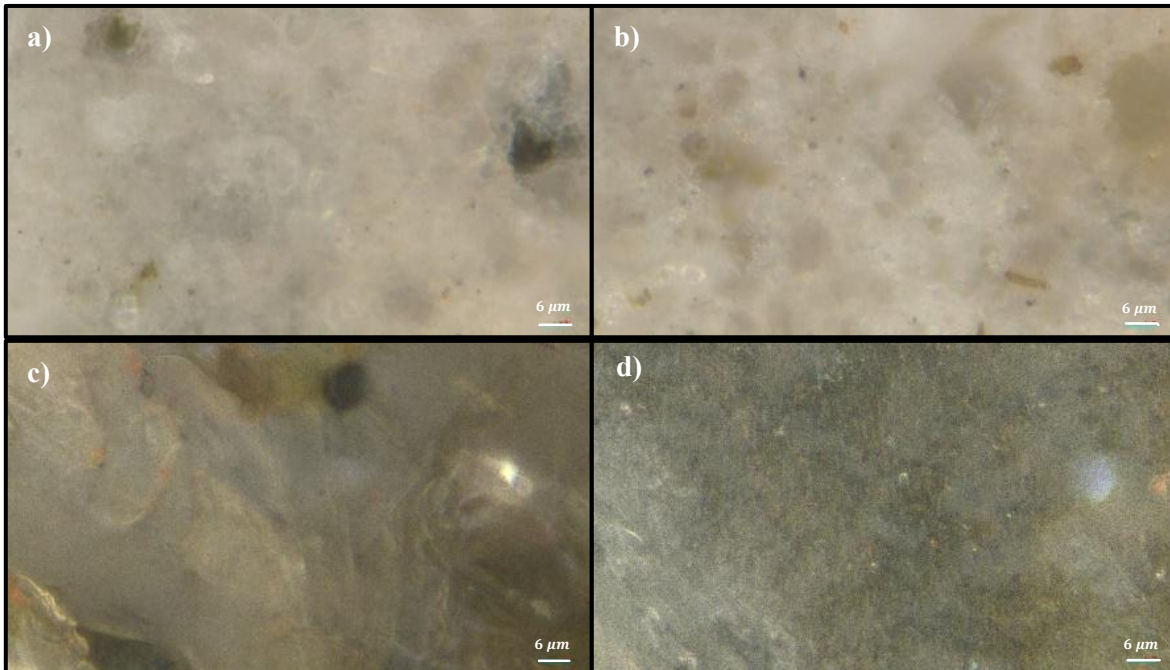


Figura 31: Microscopia óptica x100 a) Roca sintética C.AF curado en inmersión, b) Roca sintética C.AFG, c) Roca Natural expuesta a 100° C, d) Roca Natural a temperatura ambiente.

Para la figura 34, se puede notar la presencia de la matriz en las imágenes (a) y (b) la matriz del silicato de calcio totalmente hidratadas (C-S-H), este gel C-S-H conforma alrededor de un 60% del volumen de la pasta de cemento en la roca, atribuyendo a sus propiedades físicas y químicas, así mismo se denota una heterogeneidad en la zona observando porosidades y partículas de agregados distribuidos aleatoriamente, por el contrario, las superficies de las rocas sintéticas poseen menos porosidad y una superficie más homogénea, influenciando las propiedades del material.

6.2.3 Microscopía óptica de barrido

Se obtuvieron las siguientes micrografías a través del microscopio electrónico de barrido de las rocas sintéticas base cemento – agregados pétreos y las rocas naturales, con la finalidad de observar su morfología y las diferencias que existen entre ellas. Para visualizar las imágenes superficiales de las rocas sintéticas, se utilizó un voltaje de aceleración de 3.0 kV, tomando en cuenta que las muestras no fueron recubiertas con ningún material, sin embargo, se les aplicó una cinta conductora de grafito, además se esclareció la importancia del análisis de la superficie del material, y para ello se utilizó el detector de electrones secundarios (SE).

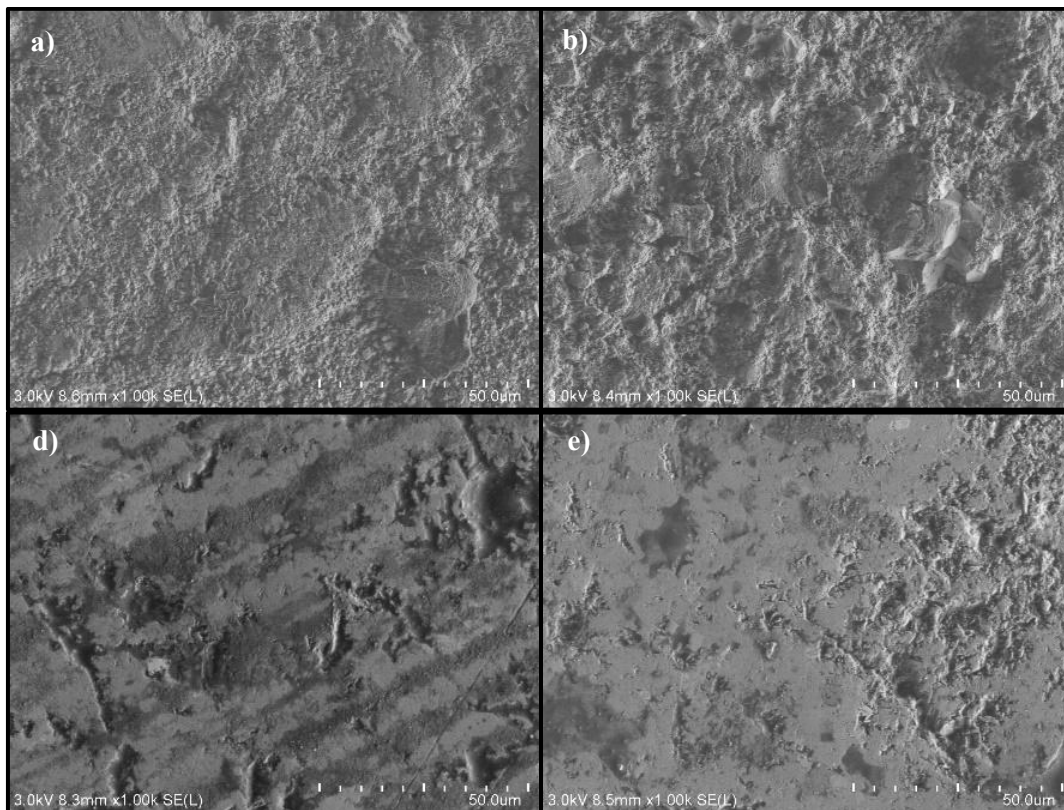


Figura 32: Microscopia electrónica de barrido x1.00k a) Roca sintética C.AF curado en inmersión, b) Roca sintética C.AFG, c) Roca Natural expuesta a 100° C, d) Roca Natural a temperatura ambiente.

En la figura 35 (a) y (b), se observan que las rocas sintéticas poseen una morfología semejante, dicha similitud se refiere a la rugosidad en la superficie y pequeñas porosidades que son producto de las inclusiones de aire del material al momento del mezclado para su

elaboración, que tienen un orden aproximado de $1 - 5 \mu m$, estas porosidades son comunes en este tipo de material.

Es importante mencionar que las porosidades promueven las concentraciones de esfuerzos en el material, y aumentando la probabilidad de propagación de las grietas al momento de resistir cargas, es por ello que, al momento de elaborar las rocas sintéticas, se priorizó el compactado del material en el molde, con la finalidad de disminuir el contenido de aire y la porosidad. Por otro lado, se puede observar que las rocas naturales en la figura 34 (c) y (d), poseen menor cantidad de porosidad, manifestando una superficie más lisa y un tamaño de partícula mucho más pequeño que la escala micrométrica.

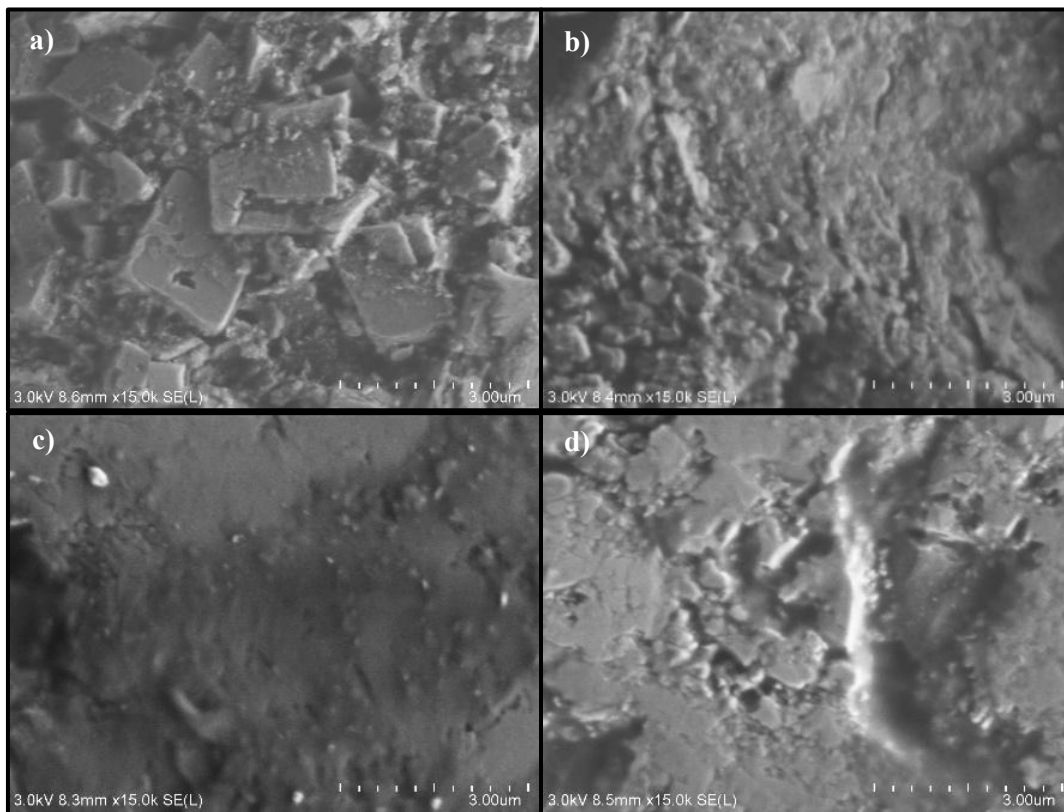


Figura 33: Microscopia electrónica de barrido x15.00k a) Roca sintética C.AF curado en inmersión, b) Roca sintética C.AFG, c) Roca Natural expuesta a 100° C, d) Roca Natural a temperatura ambiente.

De la misma manera, en la figura 36 se puede visualizar de manera clara la morfología que poseen las superficies de las rocas sintéticas y naturales, en (a) se observan los cubos de

caliza en la superficie de la roca sintética C.AF, con una longitud de alrededor $2 \mu\text{m}$, en (b) se observa la textura común de una matriz de cemento hidratado, que a su vez se compone de una superficie totalmente heterogénea y con altas rugosidades. Mientras que en las rocas naturales (c) y (d) muestran un patrón más homogéneo, con superficies ligeramente finas y con rugosidades ligeramente bajas, además en (c) se alcanza a apreciar la formación de partículas cuya composición no esta identificada. Se puede apreciar que el tamaño de la partícula y la porosidad de la superficie es mínimo, esto debido a la formación de la roca en ambientes de altas presiones y temperaturas elevadas.

6.3 Composición química elemental

6.3.1 Microscopía electrónico de barrido – Espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS)

Una vez obtenidas las micrografías obtenidas en el microscopio electrónico de barrido, dos muestras se sometieron a un análisis de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, con la finalidad de obtener la composición química del material, los resultados se muestran a continuación.

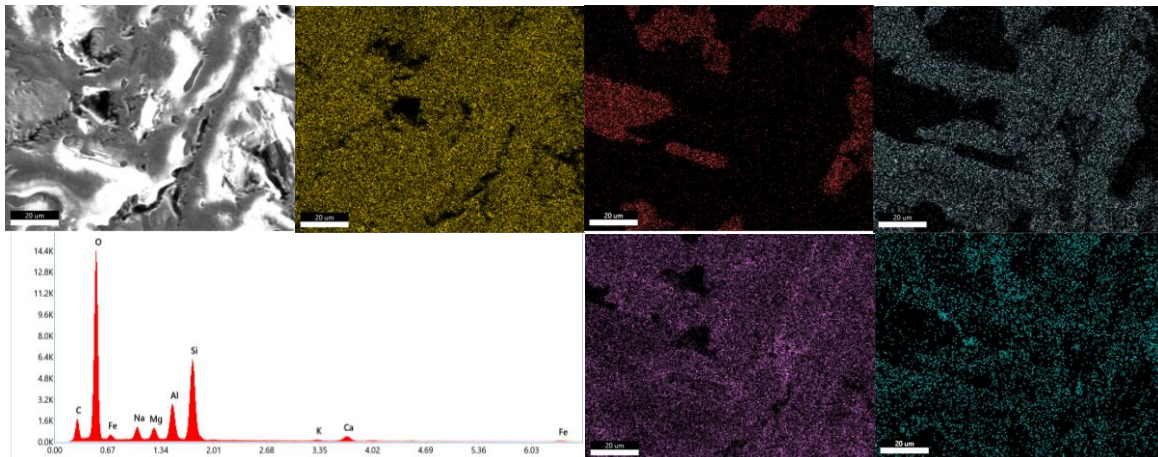


Figura 34: Microscopio electrónico de barrido - EDAX mapeo para la roca natural, se fracturó hidráulicamente a una temperatura de 100°C .

Se puede apreciar en la figura 37, que la composición de la roca natural extraída de un yacimiento geotérmico del Valle de Querétaro esta basada principalmente en óxidos, siendo

los más predominantes en esta zona analizada, óxido de silicio, alúmina, magnesia, óxido de sodio y otros compuestos en menor concentración como lo son, hierro, calcio y potasio que se consideran como inclusiones en el material, una tendencia de la roca natural es la distribución de los óxidos magnesia y alúmina, donde no comparten las mismas áreas superficiales de manera homogénea como en el caso de los demás óxidos.

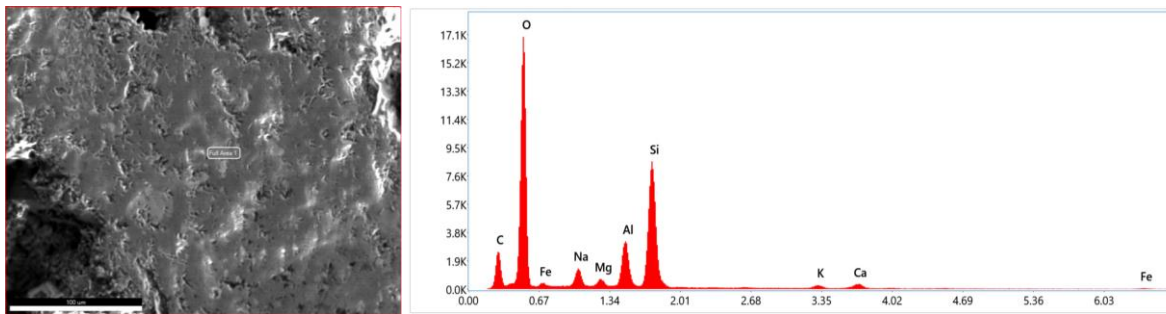


Figura 35: Microscopia electrónica de barrido – EDAX mapeo de la roca natural, se fracturó hidráulicamente a una temperatura ambiente.

En la figura 38, se puede observar la composición principal de la roca natural, la cual se fracturó a una temperatura ambiente, no obstante, es originaria de la misma reserva geotérmica que la roca natural fracturada a 100° C, como se observa en la figura 36, las composiciones son muy similares refiriéndose a la espectroscopia.

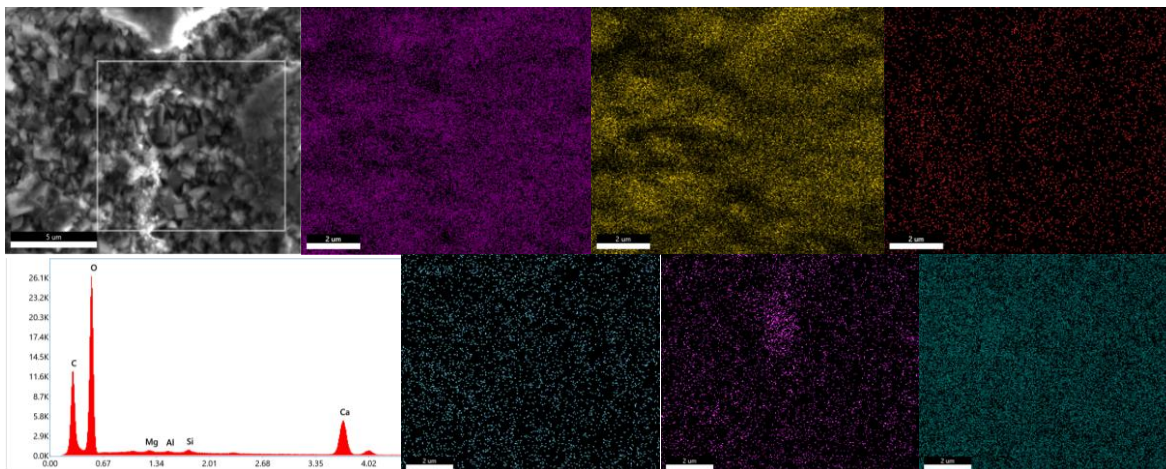


Figura 36: Microscopia electrónica de barrido - EDAX de la roca sintética tipo C.AF

En la figura 39, así mismo se observa la composición química de la roca sintética corresponde a lo esperado de acuerdo a los materias primas, como lo es el óxido de calcio el cual es el constituyente principal para el cemento portland, por otra parte se observan que los demás cerámicos se encuentran en bajas concentraciones, considerándose de igual manera, inclusiones en la estructura, como pueden ser óxido de silicio, alúmina y magnesia, adicionalmente se aprecia que existe un alto contenido de carbono, por una parte se encuentra la formación de carbonato de calcio (CaCO_3) en la estructura de la roca sintética, por otra parte, se debe a la cinta de grafito, la cual se adhirió a la muestra con la finalidad de proporcionar mayor conductividad, es por ello que durante esta y demás análisis se espera que el carbono sea encontrado dentro de las espectroscopías.

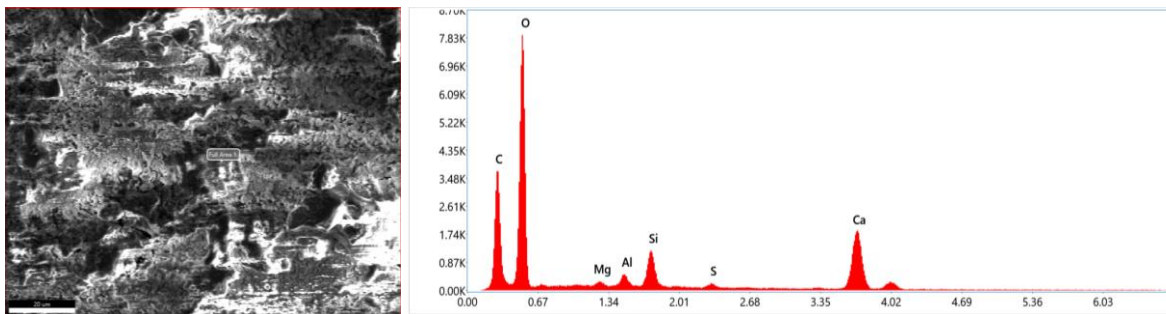


Figura 37: Microscopio electrónico de barrido - EDAX de la roca sintética tipo C.AFG

De la misma manera se puede observar que la figura 40 cuenta con una composición química similar a la roca sintética C.AF curada por inmersión (fig. 39), en cambio, esta roca sintética posee un agregado con un mayor diámetro prenominal, pero como se puede observar, su composición no difiere a lo encontrado con la roca sintética tipo C.AF (fig. 39) ya que poseen altos contenidos de óxido de calcio, sin embargo el óxido de silicio es el único que se encuentra en mayor cantidad en esta zona analizada.

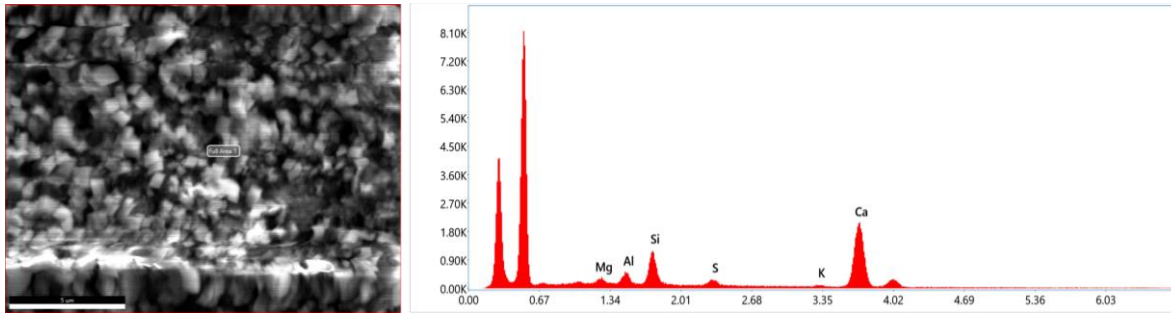


Figura 38: Microscopio electrónico de barrido - EDAX de la roca sintética tipo C.A.F con curado por aspersor en ambiente controlado con 100% de humedad.

Por último, se realizó un análisis químico para la roca sintética del tipo C.A.F, sin embargo, esta misma se sometió a un método de curado por aspersor en una cámara al 100% de humedad, cuenta con una composición química similar a la roca sintética C.A.F curada por inmersión (fig. 39), de igual modo se observa su alto contenido de óxido de calcio y óxido de silicio.

6.3.1 Difracción de rayos X

Para complementar la composición química arrojada por el EDS, se obtuvieron los siguientes resultados para el análisis de difracción de rayos X.

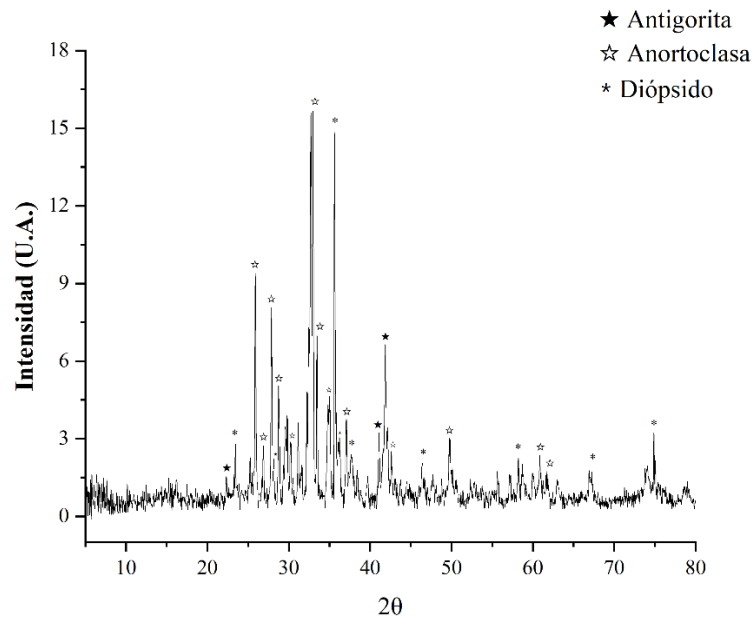


Figura 39: Difracción de rayos X para roca natural, fracturada hidráulicamente a 100° C de temperatura.

Se recopilaron las siguientes fases en las respectivas reflexiones HKL característica, correspondientes a antigorita, anortoclasa y diópsido. Al obtener la ficha técnica de cada material, se obtiene la respectiva composición química de cada una, las cuales se enlistan a continuación.

Tabla 15: Composición química de la roca natural fracturada a 100° C encontrada en la difracción de rayos X.

Material	Composición Química
Antigorita	$H_{58}Mg_{45}O_{138}Si_{32}$
Anortoclasa	$Al_{1.1}Ca_{0.1}K_{0.27}Na_{0.63}O_8Si_{2.9}$
Diópsido	$Al_{0.19}Ca_{0.88}K_{0.12}Mg_{0.83}O_6Si_{1.98}$

Correspondiendo a la composición química obtenida en el EDS, por otra, al ser una roca natural, posee una composición de fases amorfas muy pronunciada, eso se destaca en la cantidad de reflexiones que aparecen como ruido en el difractograma. Esta composición química es común de encontrar cerca de las reservas volcánicas ya que se trata de una roca metamórfica en el caso de la antigorita [70], la fase anortoclasa también se puede encontrar en zonas volcánicas, sin embargo es usual encontrarla donde predominan altas temperaturas, desde los 150° C a los 400° C [71] y por ultimo esta el diópsido, esta fase es común en rocas ígneas y metamórficas [72].

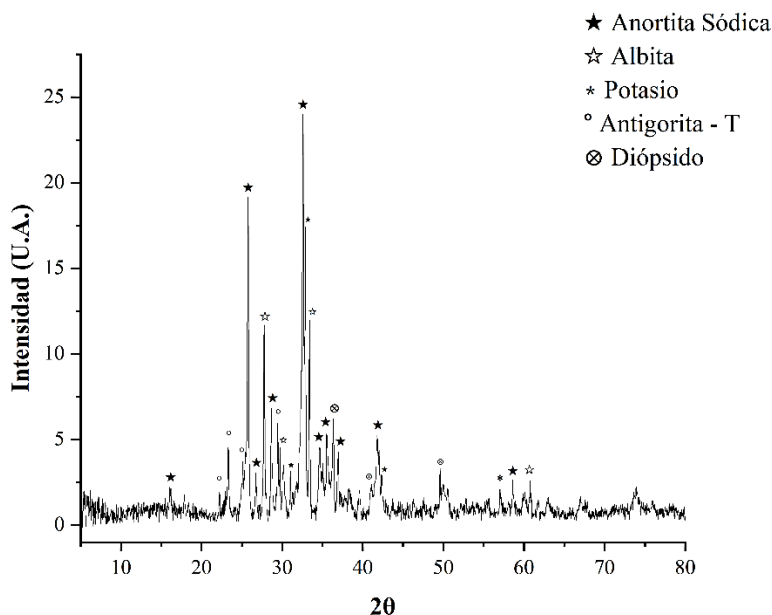


Figura 40: Difracción de rayos X para roca natural, fracturada hidráulicamente a 100° C.

De la misma manera para la roca natural fracturada hidráulicamente a temperatura ambiente, se obtuvieron resultados similares, sin embargo se encontraron fases similares y otras dos extras, una de ellas, el potasio (K) puro y la otra, es albita, la cual es una variante de la anortita, la anortita sódica en este caso es una variante de la anortoclasa mencionada en la roca anterior, con la diferencia de que el potasio (K) se encuentra dentro de la red cristalina del material.

Tabla 16: Composición química de la roca natural fracturada a temperatura ambiente encontrada en la difracción de rayos X.

Material	Composición Química
Anortita Sódica	$Al_{1.52}Ca_{0.52}Na_{0.48}O_8Si_{2.48}$
Albita	$AlNaO_8Si_3$
Potasio	K
Antigorita-T	$Mg_{48}O_{147}Si_{34}$
Diópsido	$Al_{0.19}Ca_{0.88}K_{0.12}Mg_{0.83}O_6Si_{1.98}$

En las rocas sintéticas, se puede observar en cambio, la composición típica de un cemento hidratado y curado a los 28 días, para el caso de las rocas sintéticas tipo C.A.F, se obtiene el difractograma de la figura 44.

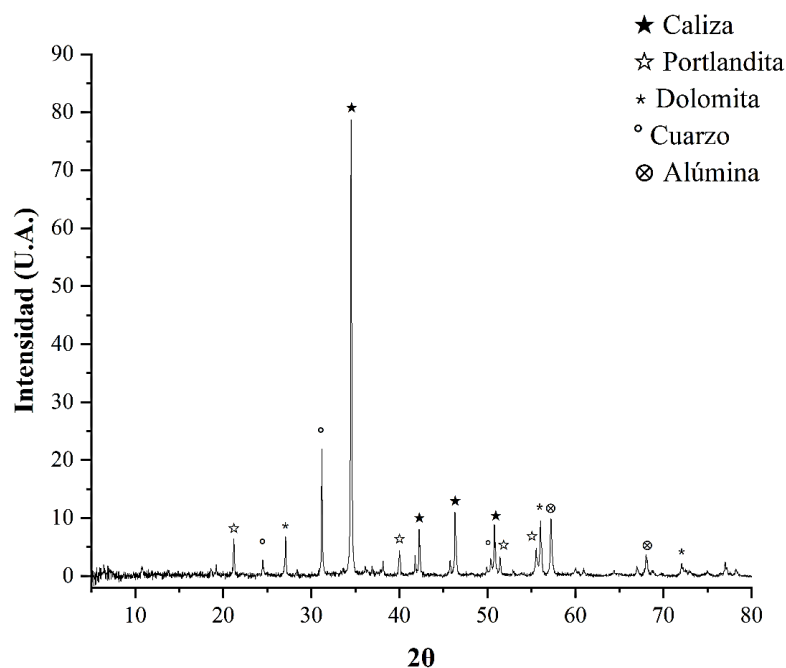


Figura 41: Difractograma para roca sintética C.A.F.

En la figura 45, se puede observar las reflexiones HKL características en los ángulos 34.51°, 42.27°, 46.35 y 50.78 para la caliza o también llamado CaCO_3 , así como también se pueden encontrar fases típicas de los cementos hidratados, en este caso la portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ encontrándose en el 21.22°, 40.04° 51.49° y 55.56°.

Durante el análisis de EDS se observó la presencia de Mg en la roca sintética, la cual puede ser identificada como dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ en 27.08°, 56.03°, 72.13°. Por otro lado, el Cuarzo SiO_2 se observa en 24.45°, 31.20° y 50.37°. Por último se observa que la alúmina Al_2O_3 se encuentra presente los ángulos 57.25° y 68.07°.

En la figura 45, se muestra el difractograma de la roca sintética C.AFG.

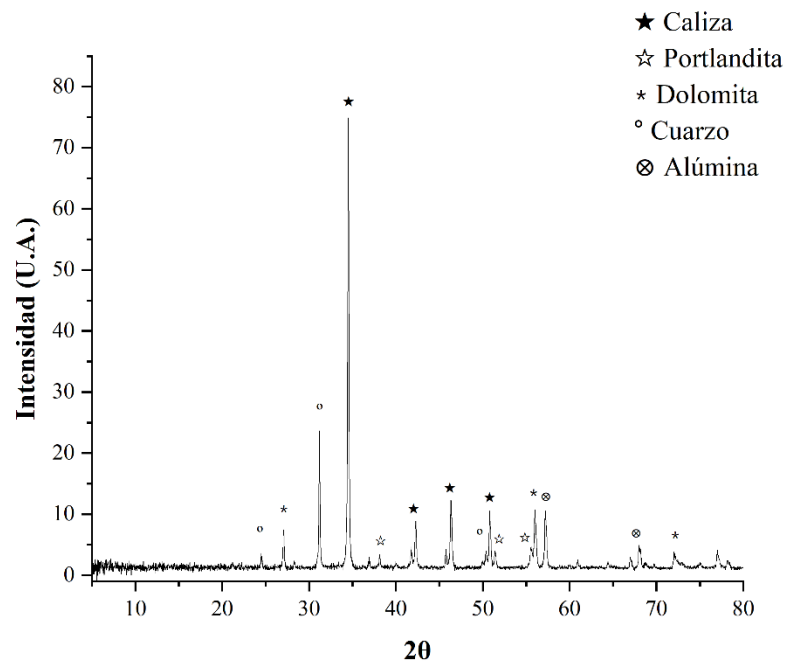


Figura 42: Difractograma de la roca sintética C.AFG.

Como es de esperarse, en la figura 45 se observa el difractograma para la roca sintética C.AFG, al compararla con la roca sintética C.AF se puede apreciar una similitud en la composición y en los ángulos donde se encuentran las reflexiones HKL características con mayor intensidad.

Capítulo VII: Conclusiones

El presente trabajo logra establecer una correlación entre la energía de fractura, la estructura interna y el número de componentes en muestras de rocas sintéticas y rocas naturales extraídas de yacimientos geotérmicos. A partir de los resultados obtenidos, se llega a las siguientes conclusiones:

La energía de fractura en las rocas naturales es superior a la de las rocas sintéticas. El valor promedio de energía de fractura para las rocas sintéticas del tipo C.AF es de 105.5 J/m², mientras que para las rocas sintéticas del tipo C.AFG es de 166.67 J/m². Por otro lado, la energía de fractura obtenida para las rocas naturales es de 213 J/m². En términos de diferencia porcentual, se observa que las rocas naturales presentan una energía de fractura superior en un 102.37% en comparación con las rocas sintéticas del tipo C.AF, y una diferencia del 28.1% en comparación con las rocas sintéticas del tipo C.AFG. Estos resultados demuestran que la roca C.AFG muestra un comportamiento mecánico más cercano al de una roca natural.

Al analizar la estructura interna de las rocas, se puede observar que los compuestos químicos elementales presentes en ambos tipos de rocas son similares. Sin embargo, mediante el estudio de difracción de rayos X, se ha evidenciado que existen notables diferencias en las fases presentes entre ellos. En contraste, las rocas naturales han experimentado procesos geológicos en la corteza terrestre, caracterizados por altas presiones y temperaturas, lo que ha resultado en una mayor cohesión, menor porosidad y un tamaño de partícula más grande. Estos factores influyen en la resistencia del material y, en consecuencia, en la energía requerida para fracturarlo.

El número de componentes influye en las propiedades de las rocas, en el caso de las rocas naturales, estas presentan una amplia diversidad de fases, algunas de las cuales son desconocidas debido a la presencia de fases amorfas en su estructura, lo que dificulta su análisis mediante difractogramas. Por lo tanto, el número de componentes en las rocas naturales sigue siendo desconocido, independientemente de la cantidad de análisis realizados.

La influencia en el número de componentes en las rocas sintéticas se puede analizar directamente a través de la energía de fractura. Aquellas rocas sintéticas con menos componentes, como las C.AF (ya que no presentan en su composición agregados gruesos),

presentan una energía de fractura más baja. Por otro lado, las rocas sintéticas C.AFG, que contienen un mayor número de componentes, exhiben una mayor energía de fractura. Esto se debe a una mejor distribución y trabajo de los esfuerzos a lo largo de la matriz de la roca, donde los agregados gruesos desempeñan un papel importante al redistribuir dichos esfuerzos. Estadísticamente hablando, esto reduce la varianza o el rango de falla (módulo de Weibull) de las rocas sintéticas C.AFG. A pesar de que estas rocas presentan una mayor heterogeneidad en comparación con las C.AF, la distribución de los agregados gruesos contribuye significativamente a aumentar la energía de fractura.

Al correlacionar los tres factores, se concluye que tanto la composición de las rocas sintéticas como las naturales, así como su estructura interna, influyen directamente en la energía requerida para la fractura del material. Sin embargo, es importante considerar la especificación de parámetros de la estructura interna, como la cohesión, porosidad y tamaño de partícula, que tienen un impacto directo en dicha energía.

Trabajo a futuro

En la actualidad el costo y trabajo para replicar con exactitud una roca natural proveniente de profundidades mayores a 1 km, son elevados, ya que, los procesos geológicos complejos y la influencia de numerosos factores hacen que sea difícil igualarlos en laboratorio. Esto conlleva buscar opciones más óptimas las cuales se replica parcialmente el comportamiento de las rocas naturales. Como actividades complementarias quedan las siguientes:

- Considerar parámetros de la estructura interna como cohesión, porosidad y tamaño de partícula.
- Establecer las relaciones que pueden existir con la energía de fractura y la morfología de la superficie de fractura.
- Determinar individualmente la energía de fractura específica para cada uno de los componentes del material, de esta manera obtener la energía de fractura global independiente del tamaño del espécimen.
- Utilizar otros métodos de cálculo de energía de fractura y corroborar los valores obtenidos, debido a que la metodología RILEM, no es una normativa, si no, una recomendación.
- Utilizar otros cementos de mayor resistencia, con la finalidad de obtener energías de fractura mayores, cercanos a los de una roca natural, ya sea proveniente de los yacimientos geotérmicos o no, con la finalidad de comparar los resultados y establecer una relación lineal entre ellos.
- Utilizar software para la estimación y cálculo de la energía de fractura de manera simulada, además de compararla con los valores obtenidos en la experimentación en laboratorio.

Referencias

- [1] P. Olasolo, M. C. Juárez, M. P. Morales, S. Damico, and I. A. Liarte, “Enhanced Geothermal Systems (EGS): a review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 133–144, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.031.
- [2] O. Rodríguez Villarreal, A. Varela Valdez, C. La Borderie, G. Pijaudier-Cabot, and M. Hinojosa Rivera, “Estimation of Fracture Energy from Hydraulic Fracture Tests on Mortar and Rocks at Geothermal Reservoir Temperatures,” *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 54, no. 8, pp. 4111–4119, 2021, doi: 10.1007/s00603-021-02496-x.
- [3] R. A. Schultz, *Geologic Fracture Mechanics*, 1st Editio. New York: Cambridge University Press, 2019. doi: 10.1017/9781316996737.
- [4] A. Varela Valdez, S. Morel, A. Marache, M. Hinojosa, and J. Riss, “Influence of fracture roughness and micro-fracturing on the mechanical response of rock joints: a discrete element approach,” *Int. J. Fract.*, vol. 213, no. 2, pp. 87–105, 2018, doi: 10.1007/s10704-018-0308-5.
- [5] U. Ortiz and M. Hinojosa Rivera, “Geometría de Fractales y Autoafinidad en Ciencia de Materiales,” *Ingenierías*, vol. 1, no. 1, pp. 15–21, 1998.
- [6] E. J. Tarbuck, F. K. Lutgens, and D. Tasa, *Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física*, 8th Ed. Madrid: PEARSON PRENTICE HALL, 2005.
- [7] K. Bucher and R. Grapes, *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*, 8th Ed., vol. 39, no. 9. Springer, 1975. doi: 10.1016/0016-7037(75)90141-6.
- [8] A. Ghassemi, “A Review of Some Rock Mechanics Issues in Geothermal Reservoir Development,” *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 30, no. 3, pp. 647–664, 2012, doi: 10.1007/s10706-012-9508-3.
- [9] Y. Zhang and G. F. Zhao, “A Global Review of Deep Geothermal Energy Exploration: From a View of Rock Mechanics and Engineering,” *Geomech. Geophys. Geo-Energy Geo-Resources*, vol. 6, no. 1, 2020, doi: 10.1007/s40948-019-00126-z.
- [10] E. M. Gell, S. M. Walley, and C. H. Braithwaite, “Review of the Validity of the Use of Artificial Specimens for Characterizing the Mechanical Properties of Rocks,” *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 52, no. 9, pp. 2949–2961, 2019, doi: 10.1007/s00603-019-01787-8.
- [11] A. Muñoz-Ibañes, A. Pérez-Quintana, M. Herbón-Penabad, R. Juncosa-Rivera, and J. Delgado-Martín, “Synthetic Porous Rock Manufacturing For Hydronynamic and Petrophysical Analyses,” *ISRM Int. Symp. - EUROCK 2020*, 2020.
- [12] M. Doblaré Castellano and L. Gracia Villa, *Fundamentos de la Elasticidad Lineal*, 1st Ed. España: Sintesis Editorial, 1998.
- [13] A. A. Griffiths, “The Phenomena of Rupture and Flow in Solids,” *Philos. Trans. R. Soc.*, no. 1, pp. 9–14, 1995, doi: 10.1098/rsta.1921.0006.
- [14] G. R. Irwin and D. C. Washington, “Analysis of Stresses and Strains Near the End of

- a Crack Traversing a Plate,” *J. Appl. Mech.*, vol. 24, pp. 361–364, 1957.
- [15] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4th Ed. New York: CRC Press, 2017.
- [16] D. R. Askeland, P. P. Fulay, and W. J. Wright, *The Science and Engineering of Materials*, 6th Ed., no. 1. 2010. doi: 10.1007/BF02658426.
- [17] P. J. Tumidajski, L. Fiore, T. Khodabocus, M. Lachemi, and R. Pari, “Comparison of Weibull and normal distributions for concrete compressive strengths,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 33, no. 10, pp. 1287–1292, 2006, doi: 10.1139/L06-080.
- [18] A. Tarokh and A. Fakhimi, “Discrete Element Simulation of the Effect of Particle Size on the Size of Fracture Process Zone in Quasi-Brittle Materials,” *Comput. Geotech.*, vol. 62, pp. 51–60, 2014, doi: 10.1016/j.compgeo.2014.07.002.
- [19] J. Lee and M. M. Lopez, “An Experimental Study on Fracture Energy of Plain Concrete,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 8, no. 2, pp. 129–139, 2014, doi: 10.1007/s40069-014-0068-1.
- [20] K. Otsuka and H. Date, “Fracture Process Zone in Concrete Tension Specimen,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 65, pp. 1–13, 2000.
- [21] L. J. et al. Jankowski, “Formation of the Fracture Process Zone in Concrete,” vol. 36, no. 2, pp. 245–253, 1990.
- [22] P. Kumar Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete - Microstructure, Properties, and Materials*, 3rd Ed. The McGraw-Hill Companies, 2006. doi: 10.1036/0071462899.
- [23] K. Haidar, G. Pijaudier-Cabot, J. F. Dubé, and A. Loukili, “Correlation between the internal length, the fracture process zone and size effect in model materials,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 38, no. 276, pp. 201–210, 2005, doi: 10.1617/14053.
- [24] G. Mourot, S. Morel, E. Bouchaud, and G. Valentin, “Scaling properties of mortar fracture surfaces,” *Int. J. Fract.*, vol. 140, no. 1–4, pp. 39–54, 2006, doi: 10.1007/s10704-005-3471-4.
- [25] Z. P. Bazant, “Size Effect,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 37, pp. 69–80, 2000.
- [26] Zdeněk P Bažant, Josko Oibolt, and Rolf Eligehausen, “Fracture Size Effect: Review of Evidence For Concrete Structures,” *J. Struct. Eng.*, vol. 120, no. 8, pp. 2377–2398, 1994.
- [27] B. Zhang and N. Bicanic, “Fracture Energy of High-Performance Concrete at High Temperatures Up to 450°C: The Effects of Heating Temperatures and Testing Conditions (Hot and Cold),” *Mag. Concr. Res.*, vol. 58, no. 5, pp. 277–288, 2006, doi: 10.1680/macr.2006.58.5.277.
- [28] J. Nakayama, “Direct Measurement of Fracture Energies of Brittle Heterogeneous Materials,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 48, no. 11, pp. 583–587, 1965, doi: 10.1111/j.1151-2916.1965.tb14677.x.
- [29] H. G. Tattersall and G. Tappin, “The Work of Fracture and its Measurement in Metals,

- Ceramics and Other Materials,” *J. Mater. Sci.*, vol. 1, no. 3, pp. 296–301, 1966, doi: 10.1007/BF00550177.
- [30] A. Hillerborg, “The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy G_F of Concrete,” *Mater. Struct.*, vol. 18, no. 4, pp. 291–296, 1985, doi: 10.1007/BF02472919.
- [31] S. Khalilpour, E. BaniAsad, and M. Dehestani, “A Review on Concrete Fracture Energy and Effective Parameters,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 120, no. January, pp. 294–321, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.03.013.
- [32] C. Rosselló, M. Elices, and G. V. Guinea, “Fracture of model concrete: 2 . Fracture energy and characteristic length,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. April 2005, pp. 1345–1353, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.04.016.
- [33] Z. P. Bazant and G. Pijaudier-Cabot, “Measurement of Characteristic Length of Nonlocal Continuum,” *Eng. Mech.*, no. May 2014, pp. 755–767, 1989, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115.
- [34] A. Hillerborg, M. M, and P. E. Petersson, “Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 6, no. 6, pp. 773–782, 1976.
- [35] B. B. Mandelbrot and J. A. Wheeler, “The Fractal Geometry of Nature,” *Am. J. Phys.*, vol. 51, no. 3, pp. 286–287, 1983, doi: 10.1119/1.13295.
- [36] B. B. Mandelbrot, “Fractal Character of Fracture Surfaces on Metals,” *Nature*, vol. 308, pp. 721–722, 1984, doi: 10.3323/jcorr1991.40.498.
- [37] V. E. Saouma, C. C. Barton, and N. A. Gamaleldin, “Fractal Characterization of Fracture Surfaces in Concrete,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 35, pp. 47–53, 1990.
- [38] J. Mazars, G. Pijaudier-Cabot, and C. Saouridis, “Size effect and continuous damage in cementitious materials,” *Int. J. Fract.*, vol. 51, no. 2, pp. 159–173, 1991, doi: 10.1007/BF00033976.
- [39] D. A. Lange, H. M. Jennings, and S. P. Shah, “Relationship between Fracture Surface Roughness and Fracture Behavior of Cement Paste and Mortar,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 76, no. 3, pp. 589–597, 1993, doi: 10.1111/j.1151-2916.1993.tb03646.x.
- [40] V. Y. Milman, N. A. Stelmashenko, and R. Blumenfeld, “Fracture surfaces: A critical review of fractal studies and a novel morphological analysis of scanning tunneling microscopy measurements,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 38, pp. 425–474, 1994, doi: 10.1016/0079-6425(94)90006-X.
- [41] A. Carpinteri and B. Chiaia, “Multifractal nature of concrete fracture surfaces and size effects on nominal fracture energy,” *Mater. Struct.*, vol. 28, no. 8, pp. 435–443, 1995, doi: 10.1007/BF02473162.
- [42] E. Bouchaud, “Scaling properties of cracks,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 9, no. 21, pp. 4319–4344, 1997, doi: 10.1088/0953-8984/9/21/002.
- [43] V. Mechtcherine, “Fracture mechanical behavior of concrete and the condition of the

- fracture surfaces on different scales,” *11th Int. Conf. Fract. 2005, ICF11*, vol. 7, pp. 5316–5321, 2005.
- [44] M. Hinojosa Rivera and M. E. Reyes Melo, “La rugosidad de las superficies: Topometría,” *Ingenierías*, vol. IV, no. 11, pp. 27–33, 2001.
- [45] M. Hinojosa Rivera, J. A. Aldaco Castañeda, and E. Reyes Melo, “Fractometría y propagación autoafín de grietas en materiales heterogéneos,” *Cienc. UANL*, vol. V, no. 1, pp. 66–69, 2002.
- [46] C. V. Nielsen and N. Bićanić, “Residual Fracture Energy of High-Performance and Normal Concrete Subject to High Temperatures,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 36, no. 262, pp. 515–521, 2003, doi: 10.1617/13880.
- [47] E. Bouchaud, “The Morphology of Fracture Surfaces: A Tool For Understanding Crack Propagation in Complex Materials,” *Surf. Rev. Lett.*, vol. 10, no. 5, pp. 797–814, 2003, doi: 10.1142/S0218625X03005530.
- [48] A. Menou, G. Mounajed, H. Boussa, A. Pineaud, and H. Carre, “Residual Fracture Energy of Cement Paste, Mortar and Concrete Subject to High Temperature,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 45, no. 1, pp. 64–71, 2006, doi: 10.1016/j.tafmec.2005.11.007.
- [49] B. W. Reed, M. Kumar, R. W. Minich, and R. E. Rudd, “Fracture roughness scaling and its correlation with grain boundary network structure,” *Acta Mater.*, vol. 56, no. 13, pp. 3278–3289, 2008, doi: 10.1016/j.actamat.2008.03.019.
- [50] S. Yang, X. Hu, K. Leng, and Y. Liu, “Correlation between Cohesive Crack-Tip Local Fracture Energy and Peak Load in Mortar Beams,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 10, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000959.
- [51] P. Xu, J. Ma, M. Zhang, Y. Ding, and L. Meng, “Fracture Energy Analysis of Concrete considering the Boundary Effect of Single-Edge Notched Beams,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/3067236.
- [52] R. M. Fedrizzi, M. A. R. de Ceia, R. M. Misságia, V. H. Santos, and I. Lima Neto, “Artificial carbonate rocks: Synthesis and petrophysical characterization,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 163, no. November 2017, pp. 303–310, 2018, doi: 10.1016/j.petrol.2017.12.089.
- [53] I. Rhee, J. S. Lee, and Y. S. Roh, “Fracture Parameters of Cement Mortar with Different Structural Dimensions Under the Direct Tension Test,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 11, pp. 1–15, 2019, doi: 10.3390/ma12111850.
- [54] J. Wang, Z. Zhu, Y. Gao, F. D. Morgan, and H. Hu, “Measurements of the seismoelectric responses in a synthetic porous rock,” *Geophys. J. Int.*, vol. 222, no. 1, pp. 436–448, 2020, doi: 10.1093/GJI/GGAA174.
- [55] Wei Xia, Sheng-ai Cui, Li-lin Xu, Lu Shen, Pin Liu, Jian-wen Woody Ju, “Study on the Fracture Performance for Rock-Concrete Interface in the High Geothermal Tunnel Environment,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 347, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128568>.

- [56] F. Zhang, ZX., Ouchterlony, “Energy Requirement for Rock Breakage in Laboratory Experiments and Engineering Operations: A Review.,” *Rock Mech Rock Eng*, vol. 55, pp. 629–667, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02687-6>.
- [57] S. Pathak, S., Mane, S., Pataskar, “Application of artificial neural network for prediction of fracture energy of concrete.,” *Asian J Civ Eng*, vol. 26, pp. 2629–2644, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s42107-025-01333-8>.
- [58] ASTM C 192/C 192M - 02, “Standar Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,” *ASTM Int.*, pp. 1–8, 2002.
- [59] D. Carreón Freyre, M. Cerca, L. L. González, and F. J. Gámez González, “Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro,” *Rev. Mex. Ciencias Geológicas*, vol. 22, no. 1, pp. 1–18, 2005.
- [60] ASTM C348 – 08, “Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars,” *ASTM International*. pp. 1–6, 2018. doi: 10.1520/C0348-08.2.
- [61] ASTM C 109/C 109 M - 99, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. on [50-mm] Cube Specimens),” *ASTM International*, vol. 04. pp. 1–6, 1999.
- [62] ASTM C469-02, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression,” *ASTM International*, vol. 04. pp. 1–5, 2002. [Online]. Available: [http://portales.puj.edu.co/wjfajardo/mecanica de solidos/laboratorios/astm/C469.pdf](http://portales.puj.edu.co/wjfajardo/mecanica_de_solidos/laboratorios/astm/C469.pdf)
- [63] ASTM C39/C39M - 09a, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” *ASTM International*. pp. 1–7, 2003. doi: 10.1520/C0039.
- [64] ASTM C293 - 08, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).” pp. 1–4, 2010. doi: 10.1520/C0293-08.2.
- [65] ASTM C143/C143M, “Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete,” *ASTM Int.*, no. 1, pp. 1–4, 2015, doi: 10.1520/C0143.
- [66] ASTM C 136 - 06, “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,” *ASTM International*, vol. 04, no. 571. pp. 5–9, 2011.
- [67] ASTM C29/C29M-07, “ASTM C29 / C29M-07, Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate,” *ASTM Int.*, pp. 3–6, 2009.
- [68] ASTM C128 - 01, “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate,” *ASTM Int.*, pp. 1–5, 2004.
- [69] ASTM C127 - 88, “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate,” *ASTM Int.*, vol. 04, no. Reapproved, pp. 1–5, 2004.
- [70] G. Capitani and M. Mellini, “The modulated crystal structure of antigorite: The m = 17 polysome,” *Am. Mineral.*, vol. 89, no. 1, pp. 147–158, 2004, doi: 10.2138/am-2004-0117.

- [71] G. E. Harlow, "The Anorthoclase Structures: The Effects of Temperature and Composition.," *Am. Mineral.*, vol. 67, no. 9–10, pp. 975–996, 1982.
- [72] A. D. Stalios, P. Delavignette, and R. de Batist, "Transmission electron microscopy observation of crystal defects in a natural diopside mineral," *Phys. Status Solidi*, vol. 107, no. 2, pp. 759–767, 1988, doi: 10.1002/pssa.2211070230.