



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE PROBETAS DE ROCAS CON CAVIDADES CILÍNDRICAS

Trabajo realizado por:

Diego Adolfo Gatica Urtubia

Dirigido:

Jorge Castro González

Marina Miranda Manzanares

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Mención:

Construcciones Civiles

Santander, octubre de 2020

TRABAJO FIN DE GRADO

Aprovechar este espacio para dar las gracias totales a mis padres, Gustavo Gatica y Gilda Urtubia que si no fuera por ellos no sería posible de tener la oportunidad de terminar mis estudios en Santander. Al igual que a mis hermanos por el constante apoyo, enseñanzas de rigurosidad y de constancia que se necesitan para lograr los objetivos.

Por otro lado, dar las gracias a Jon Justo, Jorge Castro y Marina Miranda por la paciencia al momento de trabajar, donde logré sentirme acogido por el equipo de trabajo, además de darme a conocer la dinámica de un laboratorio de geotecnia, así mismo se extiende este agradecimiento a todo el equipo del Dpto. de ciencia e ingeniería del terreno y de los materiales

En último, pero no menos importante, a todos aquellos que han hecho que la vida en Santander sea más comfortable, partiendo por Jorge Rodríguez que a nivel académico su preocupación y dedicación a resolver dudas o inconvenientes desde el primer día nunca faltaron y aquellas amistades que día a día hacen de Santander un lugar para quedarse.

RESUMEN



RESUMEN

TÍTULO TFG: “COMPORTAMIENTO MECANICO DE PROBETAS DE ROCAS CON CAVIDADES CILINDRICAS”

AUTOR: Diego Adolfo Gatica Urtubia

DIRECTORES: Jorge Castro González, Jon Justo Urrutia, Marina Miranda Manzanares

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Civil mención en Construcciones Civiles

Palabras clave: Mecánica de rocas, mecánica de la fractura, arenisca, caliza, mármol, modelación numérica, ensayos laboratorio, cavidades cilíndricas.

El estudio realizado en el presente trabajo de fin de grado (TFG), consiste en la investigación del comportamiento mecánico de cuatro tipos de rocas, las cuales son “Arenisca Floresta”, “Caliza Moleanos”, “Mármol Macael” y “Mármol Carrara”, donde se ensayan a carga uniaxial vertical, donde se analizarán tracciones indirectas producidas en cavidades cilíndricas.

El estudio de laboratorio se ha realizado en 27 probetas, donde se consideran 9 para cada tipo de roca. Estas son obtenidas de los remanentes que se utilizaron para la extracción de probetas para ensayo brasileño y compresiones simples a distintas temperaturas, trabajos realizados por el grupo de geotecnia de la Universidad de Cantabria, por lo que las cavidades tienen un diámetro estándar de 57 [mm].

Para realizar una estandarización del ensayo, se ha realizado una búsqueda bibliográfica para así tener en consideración para su ejecución, como para el análisis de sus resultados, es así que se logró determinar 2 normas relacionadas al ensayo, donde la primera describe cómo aplicar la carga sobre las probetas, indicando la duración del ensayo y el número de probetas mínimo necesario para cumplir con esta, y la segunda relativa al análisis estadístico que debe realizar sobre los datos de carga de rotura.

El objetivo principal es realizar un análisis de las tensiones producidas mecánicamente en torno a una cavidad cilíndrica realizada artificialmente, las cuales principalmente serán de tracción causando su rotura, análisis que se estudia por medio de modelación numérica en 2D y 3D en el software Plaxis, de la compañía Bentley. En el cual se entregará un desarrollo de tensiones simétricas entorno al eje vertical de la cavidad, está producida por una carga unitaria de 1 [KN/mm²], donde por medio del Método del Punto y parte de la bibliografía recolectada se determinará su precisión en relación a la carga de rotura obtenida por las 9 probetas de cada roca.

Este valor de resistencia de rotura se analizará previamente con un tratamiento estadístico, metodología obtenida a partir de normativa española, la cual dará una fiabilidad de los



resultados obtenidos durante los ensayos e identificando un límite inferior para las resistencias a tracción obtenidas, por lo que el promedio puede que varíe al pasar por el filtro del análisis.

Dentro de los resultados se revisará por medio de fotografía el modo de fractura al momento de la rotura, esperando que suceda por las zonas de alta tensión como lo arroja el modelado en Plaxis, analizando el porqué de sus semejanzas y variaciones.

El estudio finaliza con la conclusión del análisis estadístico, donde inicialmente se arroja un porcentaje que representa la homogeneidad de los valores resultantes de las cargas de rotura obtenidas en laboratorio, siendo el coeficiente de variación, el cual será distinto para cada tipo roca, donde se encontraron bajas variabilidades para las rocas “Arenisca Floresta”, “Mármol Macael” y “Mármol Carrara”, y moderada para la “Caliza Moleanos”. La siguiente corresponde a la comprobación por el método del punto, el cual entrega el cociente de la relación entre la predicción realizada gracias al modelo numérico en Plaxis 2D en conjunto con el Método del Punto y los datos de rotura obtenidos luego del tratamiento estadístico previamente realizado. Donde se determina que para los mármoles el método no fue el más eficiente debido al comportamiento elasto-plástico que poseen y por otro lado la “Arenisca Floresta” y “Caliza Moleanos”, los valores fueron cercanos a 1 lo que refleja, que la consideración de comportamiento lineal-elástico fue el correcto para el método utilizado.

ABSTRACT

ABSTRACT

TITLE TFG: “MECHANICAL BEHAVIOR OF ROCKS SAMPLES WITH CYLINDRICAL CAVITIES”

AUTHOR: Diego Adolfo Gatica Urtubia

DIRECTORS: Jorge Castro González, Jon Justo Urrutia, Marina Miranda Manzanares

DEGREE: Degree in Civil Engineering.

Keywords: Rock mechanics, fracture mechanics, sandstone, limestone, marble, numerical modelling, laboratory test, cylindrical cavities.

The work carried out in this end-of-degree project consists of the line of research into the mechanical behaviour of four types of rock, which are "Floresta Sandstone", "Limestone Moleanos", "Marble from Macael" and "Carrara Marble", which are tested under vertical uniaxial load, where indirect tractions produced in cylindrical cavities will be analysed.

The laboratory study was carried out on 27 test tubes, with 9 being considered for each type of rock. These are obtained from the remnants that were used to extract specimens for the Brazilian test and simple compression at different temperatures, work carried out by the geotechnical group of the University of Cantabria, so that the cavities have a standard diameter of 57 [mm].

To carry out a standardization of the test, a bibliographic search is carried out so as to take it into consideration for its execution, as well as for the application of its results. Thus, two standards were determined, the first one describes how to apply the load on the specimens, indicating the duration of the test and the minimum number of specimens necessary to comply with it, and the second one talks about the statistical analysis to be carried out on the breaking load data.

The main objective is to carry out an inquiry of the stresses produced mechanically around an artificially made cylindrical cavity, which will mainly be of traction causing its breakage. This analysis is studied by means of virtual modelling in 2D and 3D in the software Plaxis, from the company Bentley. A symmetrical stress development around the vertical axis of the cavity, produced by a unit load of 1 [KN/mm²], will be provided. Using the Point Method and part of the collected literature, its accuracy will be determined in relation to the breaking load obtained by the 9 specimens of each rock.

This breaking strength value will be previously analysed with a statistical treatment, methodology obtained from Spanish regulations, which will give a reliability of the results obtained during the tests and identifying a lower limit for the tensile strengths obtained, so the average may vary when passing through the filter of the investigation.

Among the results, the fracture mode at the moment of breakage will be reviewed by means

of photography, waiting for it to happen through the high tension zones as shown by the modelling in Plaxis, studying the reason for its similarities and variations.

The study ends with the conclusion of the statistical analysis, which initially yields a percentage that represents the homogeneity of the values resulting from the breaking loads obtained in the laboratory, the coefficient of variation being different for each type of rock, where low variability was found for the rocks "Floresta Sandstone", "Marble from Macael" and "Carrara Marble", and moderate for the "Moleanos Limestone". The following corresponds to the verification by the point method, which gives the ratio between the prediction made thanks to the numerical model in Plaxis 2D together with the Point Method and the breakage data obtained after the statistical treatment previously carried out. Where it is determined that for the marbles the method was not the most efficient due to the elastic-plastic behaviour they possess and on the other hand the "Floresta Sandstone" and "Moleanos Limestone", the values were close to 1 which reflects, that the consideration of linear-elastic behaviour was the correct one for the method used.

ÍNDICE

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

1.	ESTADO DEL ARTE	1
1.1.	MECÁNICA DE ROCAS	1
1.1.1.	Parámetros de rocas obtenidos por laboratorio	3
1.1.2.	Tensión en un agujero circular	4
1.2.	MECÁNICA DE LA FRACTURA	6
1.2.1.	Mecánica de la Fractura Elástico Lineal (MEFL)	7
1.2.2.	Mecánica de la Fractura Elastoplástica (MFEP)	9
1.3.	TEORÍA DE LAS DISTANCIAS CRITICAS	10
1.3.1.	Método del punto	11
2.	EQUIPOS, MATERIALES Y MÉTODO DE PREPARACIÓN	13
2.1.	EQUIPOS DE LABORATORIO	13
2.1.1.	Prensa	13
2.1.2.	LVDT	14
2.1.3.	Aparatos de frecuencia	14
2.1.4.	Geolab	15
2.2.	MATERIALES PARA ESTUDIAR	15
2.2.1.	Arenisca Floresta	16
2.2.2.	Caliza Moleano	17
2.2.3.	Mármol Macael	19
2.2.4.	Mármol Carrara	20
2.2.5.	Información mecánica	22
2.3.	MÉTODOS DE PREPARACIÓN	23
3.	MODELACIÓN NUMÉRICA	25
3.1.	MODELACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES EN PLAXIS 2D	25

3.1.1 Estudio de orientación de las probetas	29
3.2. ESTUDIO DE ESPESOR DE PROBETA POR PLAXIS 3D	31
3.3. ESTUDIO DE ESTADOS TENSIONALES	36
4. ENSAYO DE CARGA UNIAXIAL	40
4.1. PREPARACIÓN DEL ENSAYO	40
4.2. APLICACIÓN DE CARGA UNIAXIAL	41
4.3. POST ROTURA	41
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
5.1. ANÁLISIS INICIAL DE DATOS	42
5.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	43
5.3. ANÁLISIS POR MÉTODO DEL PUNTO	46
5.4. INFLUENCIA DEL COMPORTAMIENTO ELÁSTICO-LINEAL	49
5.5. DESCRIPCIÓN CUALITATIVA DE LA FRACTURA	51
CONCLUSIÓN	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de macizos rocos ISRM, 1978.	1
Figura 2. Elementos y disposición de la probeta para ensayo de tracción indirecta.	4
Figura 3. Placa perforada con carga horizontal uniaxial.	4
Figura 4. Representación de tensiones frente a una carga externa en un agujero.	5
Figura 5. (a) Tensión circular en la pared del agujero en función del ángulo de rotación.	6
Figura 6. Modos de fractura: a) Modo I b) Modo II c) Modo III.	7
Figura 7. Campo de tensiones próximo a la punta de una grieta.	9
Figura 8. Zona plástica en la punta de una grieta.	10
Figura 9. Curva tensión-distancia que se emplea para las teorías de distancias críticas.	12
Figura 10. Prensa hidráulica, con celular de 30 [T].	13
Figura 11. Transductor de desplazamiento con fijación magnético.	14
Figura 12. Equipo de acondicionador de frecuencia.	14
Figura 13. Software Geolab.	15
Figura 14. Material de estudio.	16
Figura 15. Arenisca Floresta, imagen de microscopio óptico.	17
Figura 16. Cantera de Caliza Moleano.	18
Figura 17. Caliza Moleanos, imagen de microscopio óptico.	19
Figura 18. Mármol Macael, imagen de microscopio óptico.	20
Figura 19. Mármol Carrara.	21
Figura 20. Mármol Carrara, imagen de microscopio óptico.	22
Figura 21. Grafico Resistencia a tracción por ensayo brasileño por cada roca.	23
Figura 22. Secciones transversales para elección de probetas de rocas.	26
Figura 23. Modelo de probeta en Plaxis 2D.	27
Figura 24. Malla generada para análisis en Plaxis 2D	28
Figura 25. Relación número de elementos y valores de tensiones.	28
Figura 26. (A) Disposición vertical de probeta de "Mármol Macael".	29
Figura 27. Tensiones principales horizontales por el eje vertical de la cavidad.	30
Figura 28. Modelo de probeta en Plaxis 3D.	31
Figura 29. Zona donde se ubican las tensiones máximas de tracción.	32
Figura 30. Malla generada para análisis en Plaxis 3D.	33
Figura 31. Relación número de elementos y valores de tensiones principales.	34
Figura 32. Relación tensiones de tracciones máximas en función del espesor.	35
Figura 33. Mapa de tensiones principales horizontales probeta de Arenisca Floresta.	36
Figura 34. Gráfico de tensiones de tracción Plaxis 2D para cada tipo de roca.	37
Figura 35. Gráfico de tensiones totales principales horizontales en Arenisca Floresta.	37
Figura 36. Gráfico de tensiones totales principales verticales en Arenisca Floresta.	38
Figura 37. Mapa de colores de tensiones principales verticales.	39
Figura 38. Gráfico de tensiones de compresión Plaxis 2D para cada tipo de roca.	39

Figura 39. Tabla de Cuantil 5 [%].	44
Figura 40. Grafica de promedios aritméticos de cargas para cada tipo de roca.	46
Figura 41. Corte de la probeta por zona de altas tracciones A-A' "Arenisca Floresta".	47
Figura 42. Grafico de tensiones totales normales y distancia de estudio.	48
Figura 43. Grafica de relación carga-deformación de "Arenisca Floresta".	50
Figura 44. Grafica de relación carga-deformación de "Caliza Moleano" a 23 grados.	50
Figura 45. Grafica de relación carga-deformación.	51
Figura 46. Fractura en probetas de roca "Arenisca Floresta".	52
Figura 47. Fractura en probetas de roca "Caliza Moleano".	52
Figura 48. Fractura en probetas de roca "Mármol Macael".	53
Figura 49. Fractura en probetas de roca "Mármol Carrara".	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores L y KC	11
Tabla 2. Tabla de datos "Arenisca Floresta".	17
Tabla 3. Propiedades técnicas de cada material de estudio.	22
Tabla 4. Características mecánicas de cada material.	23
Tabla 5. Dimensiones de secciones transversales de probetas de rocas.	26
Tabla 6. Dimensiones óptimas para obtener deformación planta al momento del ensayo.	35
Tabla 7. Valores de cargas máximas obtenidas por el ensayo de carga uniaxial.	43
Tabla 8. Límites mínimos esperados cálculos según anejo C.	45
Tabla 9. Aplicación del valor inferior calculado "Arenisca Floresta".	45
Tabla 10. Medidas de dispersión y de forma.	45
Tabla 11. Largo crítico y resistencias a tracción por ensayo brasileño.	47
Tabla 12. Calculo de la predicción por método del punto de la tensión de rotura.	49
Tabla 13. Cociente de la tensión de rotura en relación a la carga modelada.	49

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Se sabe que, a nivel de estudios en el ámbito de ingeniería civil, es relevante el análisis de los materiales y su comportamiento, ya sea que estos se encuentren en estado natural o sean extraídos de ellos para mirar más en profundidad sus propiedades. Lo anterior, con el fin de que cada vez estemos aprovechando de mejor manera el material, sabiendo en qué situaciones tales como las que suceden cuando hay acciones de agentes externos, estos respondan como se espera que lo hagan, con el fin de dar una seguridad estructural al momento de diseñar y elegir los materiales adecuados para las sollicitaciones en servicio.

Conociendo la necesidad de la exploración del comportamiento de los materiales, a continuación, queremos presentar el desarrollo del análisis de las propiedades mecánicas de las rocas. En concreto, es la exploración del comportamiento de cuatro tipos de rocas con cavidades realizadas artificialmente, bajo condiciones de una carga uniaxial en dirección vertical, aplicada por medio de una prensa que se utiliza para realizar ensayos de compresión simple, hasta completar la carga última de rotura propia de cada material, analizando esfuerzos de tracciones indirectas. Esta cavidad es única, pero de igual diámetro para todas, siendo de 57 [mm], ya que la probeta anteriormente fue utilizada para extraer material para ensayos de otras características, como de compresión simple y ensayos de tracción indirecta, proyecto en el cual, está trabajando el Grupo de Geotecnia de la Universidad de Cantabria, quienes aportaron con el material y el equipamiento del laboratorio para el estudio. Es así que aprovechando al máximo el material que se posee en el laboratorio, es posible seguir haciendo análisis de cada pieza que se tenga, ya que cada comportamiento es relevante, y esta, teniendo una debilidad al tener un agujero centrado que atraviesa en longitudinal la muestra, es interesante para el ámbito de la geotermia, como parte del proyecto que el laboratorio ha estado trabajando, ya que recrea de forma aproximada una situación de sondaje necesaria para su ejecución.

Dado que el detalle que posee la probeta es algo peculiar, es que se procede a realizar un análisis de mecanismos de fractura, donde se analizan las rocas con su comportamiento elástico-lineal, ocupando uno de los métodos de las teorías de distancias crítica (TDC), (Taylor, 2007), para la predicción de cargas de rotura. Lo anterior es para verificar que tan exacto fue la realización del ensayo.

Otra modalidad que se utilizará en esta exploración, es la utilización de un código número de elementos finitos, Plaxis 2D y Plaxis 3D, de la empresa Bentley, el cual tiene como función la resolución de problemas geotécnicos y geotécnicos-estructurales, los cuales a nivel de ingeniería son frecuentes, y da la posibilidad de moldear diseños reales, con todas las sollicitaciones de servicios a la que se pueda encontrar,

Para dar un mejor entendimiento previo a la realización del ensayo, es que se modelaran las probetas de manera teórica. Primero, para determinar rasgos de sus secciones con su comportamiento y tensiones, y segundo, para dar una pre visualización de cómo se comporta

el agujero en la roca, definiendo las tensiones de compresión y tracción. Estas últimas serán las de relevancia ya que, por medio del ensayo, al solo tener una carga vertical, se espera que las tensiones de tracción sean las primeras en verse reflejadas al momento de los ensayos al llevarlos a rotura, y con el análisis numérico, identificar cuáles serían las zonas por las que estas se verían reflejadas, imitando las condiciones que se tendrían al momento de utilizar la prensa para la carga y así dar una mejor precisión en los resultados.

En relación al trabajo a realizar, este se encuentra dentro de los parámetros del convenio de doble titulación entre la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, en Santander y la Escuela de Ingeniería en Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Y una vez concluido, se accede al Grado de Ingeniería Civil mención en Construcciones Civil (UNICAN) y el título profesional de Ingeniero en Construcción (PUCV). De esta manera, el conocimiento obtenido por ambas entidades fue recapitulado para el desarrollo del análisis de fractura que se realizará.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

A continuación, se presentarán los objetivos del trabajo, tanto de carácter general como específicos:

Objetivo general.

Estudiar el comportamiento mecánico de probetas de rocas con una cavidad cilíndrica bajo cargas uniaxiales, mediante ensayos de laboratorio y análisis numéricos.

Objetivos específicos.

1. Determinar carga ultima de rotura a tracción de cuatro tipos de rocas en probetas con perforaciones cilíndricas.
2. Determinar por medio de modelación numérica, los campos tensionales de las probetas.
3. Determinar variación de parámetros de resistencia de manera gráfica y porcentual.
4. Determinar precisión de parámetros de resistencia por medio del análisis de mecánica de la fractura.

Alcance.

En este apartado se desarrolla de manera breve el marco de normativas para dar contexto a la información que se analizará, donde se tomarán en consideración para los ensayos y para dar cabida a terminología técnica, las cuales serán esenciales para dar una mejor interpretación al TFG.

La normativa considerada para el desarrollo de los ensayos:

-UNE 22-950-90 Métodos de ensayo para la piedra natural. Ensayos para la determinación de la resistencia Parte 2: Resistencia a tracción.

-UNE-EN-1926-2007 Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.

Estas se tomarán en consideración tanto para el desarrollo de los ensayos, como el análisis de sus resultados. Esto permite realizar un orden de ellos de manera que entregue un valor de la fiabilidad de los ensayos. Estas en su origen, se diferencian con el tipo de ensayo, ya que la probeta a pesar de poseer la misma naturaleza, es de distintas dimensiones.

Metodología.

Para realizar el trabajo se desarrolló la siguiente metodología:

- Recopilación y análisis de bibliografía sobre la materia de mecánica de rocas.
- Recopilación y análisis de lecturas sobre la materia de mecánica de la fractura.
- Revisión y estudio de publicaciones con investigación relacionadas.
- Modelación numérica de probetas por software Plaxis 2D y Plaxis 3D.
- Elección de dimensiones de probetas por medio de análisis de campos tensionales en las probetas.
- Extracción y preparación de las probetas para ensayo.
- Ensayo de carga uniaxial vertical, por prensa hidráulica.
- Obtención de tensión de rotura por cargas de roturas y áreas de sección.
- Tratamiento estadístico bajo normativa de las tensiones resultantes.
- Comparación con predicción realizada por método del punto referente a mecánica de la fractura (Taylor, 2007)
- Análisis y discusión de los resultados obtenidos con relación a las publicaciones estudiadas.

1. ESTADO DEL ARTE



1. ESTADO DEL ARTE

Para dar entendimiento al presente trabajo de investigación se expresan y desarrollan definiciones y términos, los cuales serán fundamentales para una correcta interpretación de la base de los objetivos y el desarrollo de los análisis a efectuar.

1.1. MECÁNICA DE ROCAS

La mecánica de las rocas fue definida por el Committee on Rocks Mechanics of the Geological Society of América, en los siguientes términos: “Mecánica de rocas es la ciencia teórica y aplicada del comportamiento mecánico de la roca; es la rama de la mecánica relacionada con la respuesta de la roca al campo de esfuerzos de su entorno” (Judd, 1964).

En concreto, todo aquel material que tenga un mínimo de 1 [MPa] como resistencia a compresión simple puede definirse como terreno tipo roca, aunque las resistencias medias varían entre los rangos de 10 [MPa] y 300 [Mpa]. Teniendo en cuenta que estas elevadas resistencias, comparadas con la típica de 40 [Mpa] del hormigón, se ven afectadas por la presencia de debilidades o discontinuidades, asociados a planos de corte, fracturas de tracción, esquistosidad o la estratificación. Otro de los procesos por los que la roca se ve afectada y disminuye su resistencia es la meteorización, la cual se produce inicialmente a nivel de superficie, profundizando por estas debilidades mencionadas.

Estas discontinuidades son asociadas al estudio de rocas a una escala macro, donde se habla de una cantidad considerable de metros, es por esto que estas, se asocian a la disminución de rigidez y resistencia en comparación si es que se habla de una porción o probeta de roca pequeña, la cual no se ve afectadas por las discontinuidades.

Dicho lo anterior es que se pueden desglosar los siguientes términos:

Roca Matriz: roca que no es afectada por la presencia de juntas o discontinuidades (probeta de estudio en laboratorio).

Macizo rocoso: Conjunto de roca matriz con sus juntas y discontinuidades.

Para poder diferenciar una de la otra, es que se tiende a utilizar en la roca matriz, descripciones del tipo litológico, mencionando al tipo (Ígnea, sedimentaria, metamórfica) y aludiendo al parámetro geotécnico más habitual mencionado, siendo la resistencia a compresión simple.

En cambio, la descripción del macizo rocoso se basa en las Recomendaciones de la Sociedad Internacional de la Mecánica de Rocas, donde se enumeran 11 parámetros donde se incluyen

dos ítems que hablan sobre la roca matriz, otro para el agua y los restantes netamente sobre discontinuidades (Figura 1)

1.- ORIENTACION		2.- ESPACIAMIENTO		3.- CONTINUIDAD	
α = Dirección de buzamiento \pm 5% β = Buzamiento \pm 1%		E1 sumamente pequeño	\leq 20 mm	C1 muy baja	< 1 m
		E2 muy pequeña	20 - 60 mm	C2 baja	1 - 2 m
		E3 pequeña	60 - 200 mm	C3 media	3 - 10 m
		E4 moderado	200 - 600 mm	C4 alta	10 - 20 m
		E5 grande	600 - 2000 mm	C5 muy alta	> 20 m
		E6 muy grande	2000 - 6000 mm		
		E7 sumamente grande	> 6000 mm		
4.- RUGOSIDAD					
Esc. Intern (m)		Pequeña esc. (cm)			
		Rugosa	Lisa	Pulida	
Plano		R7	R8	R9	
Ondulado		R4	R5	R6	
Escalonado		R1	R2	R3	
5.2.- GRADO DE METEORIZACION. MACIZO ROCOSO					
5.1.- RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE S0 Roca extremadamente débil Arañada con la uña del pulgar S1 Roca muy débil Se desmenuza con golpes de la punta del martillo geol. y se puede descascarillar con la navaja S2 Roca débil Se descascarilla con la navaja con dific. Se araña superf. Con la punta del martillo geológico S3 Roca medianamente resistente No se descascarilla con la navaja Se puede romper un trozo con un golpe de martillo geológico S4 Roca resistente Se necesita más de un golpe del martillo geológico S5 Roca muy resistente Se necesitan muchos golpes para romper un trozo S6 Roca extremadamente resistente. Un trozo sólo puede astillarse con el martillo		I - Sana No hay signos visibles de meteorización. Si acaso una débil decoloración en las principales superficies de discontinuidad II - Débilmente meteorizada La decoloración indica una meteorización de la roca matriz y de las discontinuidades. Todo el medio rocoso puede estar decolorado y ser algo más débil externamente que en su condición sana III - Moderadamente meteorizada Menos de la mitad del material está descompuesto y/o desintegrado hasta la condición de suelo. Aparece roca sana o decolorada, ya sea de forma continua o en zonas aisladas IV - Muy meteorizada Más de la mitad del material está descompuesto y/o desintegrado hasta la condición de suelo. Aparece roca sana de modo discontinuo V - Completamente meteorizada Toda la roca está descompuesta y/o desintegrada. La estructura original está intacta. VI - Suelo residual Todo el material se ha transformado en suelo y la estructura original se ha destruido. Hay un gran cambio de volumen pero el suelo no ha sufrido transportes significativos			
6.- APERTURA		7.- RELLENO			
A1 Muy apretada < 0.1 mm A2 Apretada 0.1 - 0.25 mm A3 Parcialmente abierta 0.25 - 0.5 mm A4 Abierta 0.5 - 2.5 mm A5 Moderad. Ancha 2.5 - 10 mm A6 Ancha 10 mm A7 Muy ancha 1 - 10 cm A8 Extremad. Ancha 10 - 100 cm A9 Cavernosa >1 m		- Tipo de relleno - Grado de meteorización - Tamaño de partículas - Mineralogía - Propiedades de identificación - Resistencia del relleno: Grado Descripción Identificación del campo D1 Arcilla muy blanda Fácilmente penetrable varias pulgadas con el puño D2 Arcilla blanda Fácil. Penetr. varias pulgadas con el pulgar D3 Arcilla firme Penetr. varias pulg. con el pulg. con esfuerzo mod. D4 Arcilla rígida Se deja marca con el pulg. pero con gran esfuerzo D5 Arcilla muy rígida Se puede dejar marca con la uña del pulgar D6 Arcilla dura Idem. pero con gran dificultad			
8.- FILTRACION		9.- NUMERO DE FAMILIAS		10.- ESTRUCTURA DEL MEDIO ROCOSO	
F1 La discontinuidad está muy cementada y seca; el flujo de agua no parece posible. F2 La discontinuidad está seca sin evidencias de flujo de agua. F3 Está seca pero muestra evidencias de flujo de agua, es decir, manchas de moho, etc. F4 Está húmeda pero no hay agua presente. F5 Muestra filtración y goteos ocasionales pero no flujo continuo. F6 Muestra un continuo flujo de agua (Estimarlo en v mín. y describir la presión como baja, media o alta)		Masiva, con juntas aleatorias. Una familia de juntas. Una familia de juntas con algunas aleatorias Dos familias de juntas Dos familias de juntas y algunas aleatorias Tres familias de juntas Tres familias de juntas y algunas aleatorias Cuatro o más familias de juntas Roca desmenuzada, casi tierra		I Masiva: pocas juntas o espaciado muy ancho. II De bloque: aprox. Equidimensional. III Tabular: una dimensión considerablemente más pequeña que las otras dos. IV Columnar: una dimensión considerablemente mayor que las otras dos. V Irregular: amplias variaciones del tamaño y forma de bloque VI Desmenuzada: muchas juntas TAMAÑO DEL BLOQUE DESCRIPCION Jv (Juntas/m ³) Bloques muy grandes < 1 Bloques grandes 1 - 3 Bloques medianos 3 - 10 Bloques pequeños 10 - 30 Bloques muy pequeños >30	

Figura 1. Descripción de macizos rocos (ISRM, 1978)



Dado que el estudio a realizar fue ejecutado dentro de laboratorio, es que se desarrollaran los conceptos relaciones con la roca matriz y su comportamiento mecánico, dejando de lado las macro consideraciones que se pueden tener al momento de hablar de macizo rocoso.

1.1.1. Parámetros de rocas obtenidos por laboratorio

Sabiendo que se analizaran probetas de roca intacta, es decir roca matriz, es que a continuación se describen los parámetros disponibles que se pueden obtener mediante ensayos mecánicos y de índice, disponibles en un laboratorio de rocas. Con ellos es posible evaluar para clasificar más en detalle el tipo de roca, sabiendo características de resistencia y rigidez, además de durabilidad y deterioro.

En cuanto a los ensayos del tipo mecánico, es que podemos recrear los modos de falla y las condiciones que se pueden encontrar en terreno, considerando las cargas propias que puedan existir, para ello se realiza la extracción de material rocoso de las canteras autorizadas, por medio de brocas o sierras adiamantadas especializadas para la toma de testigos.

En el laboratorio se pueden encontrar los siguientes tipos de ensayos mecánicos:

- Compresión simple
- Triaxial
- Tracción directa
- Ensayo brasileño (tracción indirecta)
- Martillo Schmidt
- Galgas extensométricas para parámetros de deformación

Para el caso de los ensayos de índice, se deja en claro que estos determinan parámetros internos de la roca, considerando agua y vacíos, y los estados físicos en los que estos se puedan encontrar. Es así como se pueden determinar las siguientes características:

- Porosidad
- Contenido de humedad
- Saturación
- Peso unitario
- Durabilidad
- Ultrasonido

Considerando la teoría del análisis a realizar, es que se tratarán de demostrar las resistencias a tracción, a igual forma, que lo intenta realizar el ensayo brasileño, pero de manera indirecta. Es así que el ensayo de tracción indirecta se realiza por medio de dos mandíbulas de acero para la aplicación de la carga.

Las probetas a ensayar están normalizadas con un mínimo de 50 [mm] y un espesor igual al

radio de esta, sin marcas de herramientas ni irregularidades a lo largo, para reducir los factores que puedan interferir en los resultados.

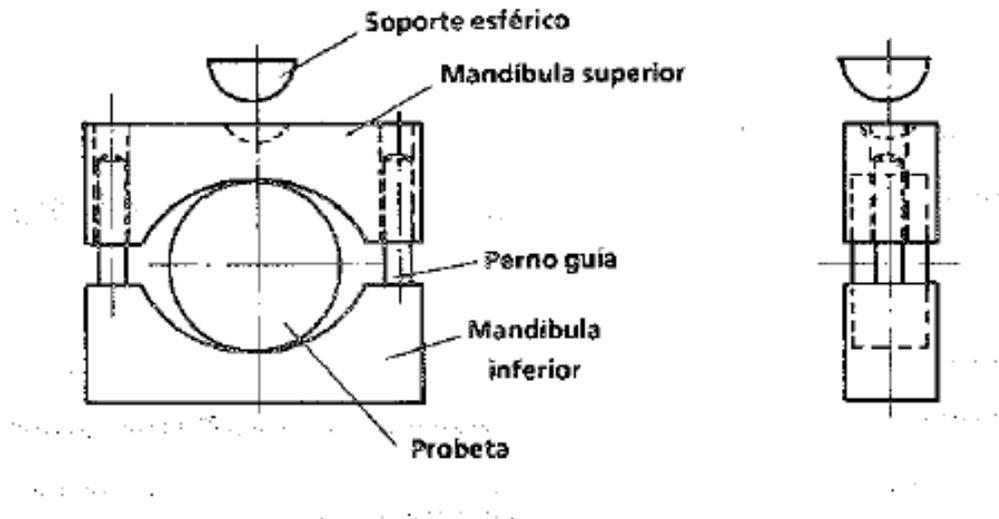


Figura 2. Elementos y disposición de la probeta para ensayo de tracción indirecta.

Fuente: UNE- 22-950-90. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 2: Resistencia a Tracción.

1.1.2. Tensión en un agujero circular

Para el desarrollo de la investigación, se hablará del conjunto de tensiones que se concentran en un agujero circular, que gracias al ingeniero alemán Kirsch en 1898 pudo solucionar, indicando las formulaciones correctas de tensiones en un agujero en una placa infinita sometida a una tensión uniaxial σ_1^∞ centrado de radio a como lo muestra la Figura 2.

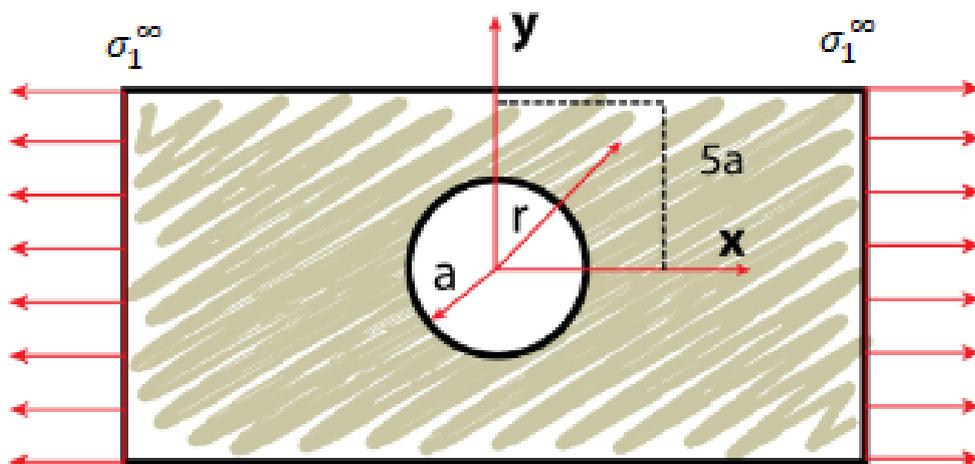


Figura 3. Placa perforada con carga horizontal uniaxial (Realpe, 2017).

Lo anterior, refleja el siguiente análisis de tensiones:

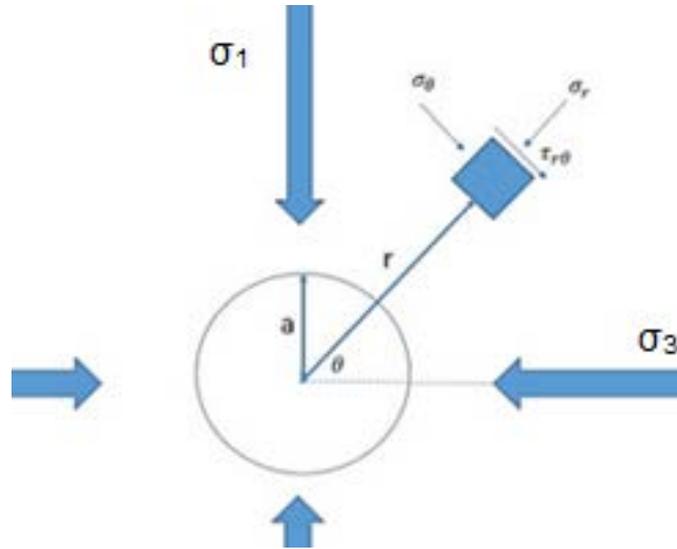


Figura 4. Representación de tensiones frente a una carga externa en un agujero cilíndrico en un macizo rocoso (Jarufe, 2017)

Donde se obtienen las siguientes expresiones, las cuales describe la tensión radial producida a la distancia r del punto de interés (σ_{rr}), tensión inducida por el ángulo formado por la distancia y la horizontal, es decir la tensión circunferencial ($\sigma_{\theta\theta}$) y tensión tangencial por interacción de esfuerzos por distancia y ángulo inducido ($\tau_{r\theta}$).

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2}\sigma_1^\infty \left[1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right] - \frac{1}{2}\sigma_1^\infty \left[1 + 3\left(\frac{a}{r}\right)^4 \right] \cos 2\theta$$

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2}\sigma_1^\infty \left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right] + \frac{1}{2}\sigma_1^\infty \left[1 - 4\left(\frac{a}{r}\right)^2 + 3\left(\frac{a}{r}\right)^4 \right] \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}\sigma_1^\infty \left[1 + 2\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 3\left(\frac{a}{r}\right)^4 \right] \sin 2\theta$$

Donde se considera que σ_1^∞ como la tensión principal in situ que se emplea horizontalmente de compresión donde puede tomar un valor negativo este pasa a considerarse como un esfuerzo de tracción. Esto se ve ejemplificado en la Figura 4, donde se aplica de manera positiva y se detalla la forma en que se relaciona el esfuerzo producido por el ángulo en estudio y la carga aplicada sobre el agujero.

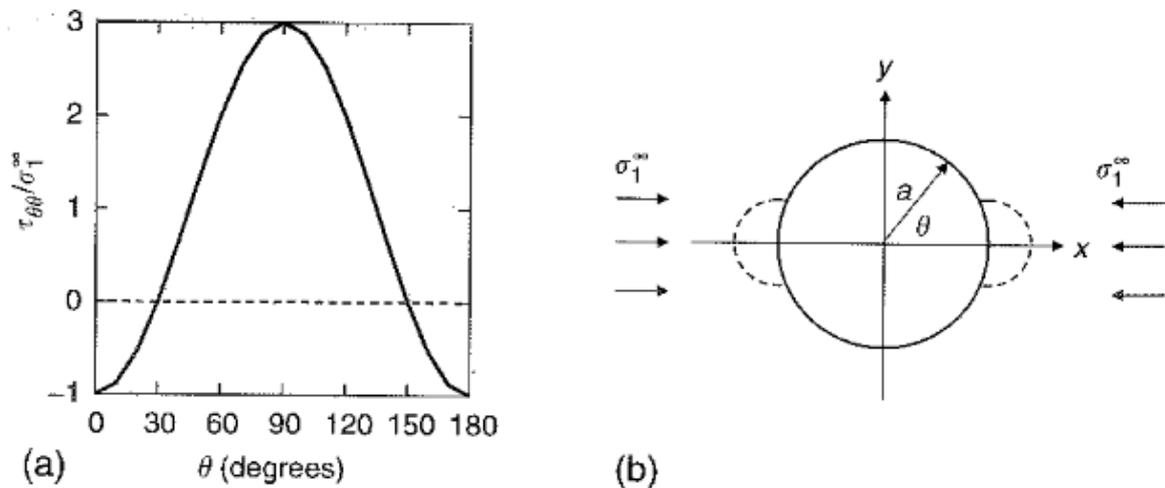


Figura 5. (a) Tensión circular en la pared del agujero en función del ángulo de rotación, medido desde la dirección de la carga infinita σ_1^∞ (Jaeger, 2007)

Es así que se demuestra que para los valores que se generan en un ángulo de 90° desde el esfuerzo aplicado σ_1^∞ es que toma hasta 3 veces el valor resultante. Para usos prácticos del estudio es que se considera solo las zonas de tracciones, es decir según la Figura 4, es que se tiene un valor de -1 en la relación $\sigma_{\theta\theta}/\sigma_1^\infty$, ya que la respuesta asociada a una tensión de compresión es el mismo valor como respuesta en tensión en el borde la cavidad cilíndrica.

1.2. MECÁNICA DE LA FRACTURA

Teniendo la incertidumbre de cómo es que se comportan mecánicamente elementos frente a defectos sean naturales del material o que estos hayan sido producidos artificialmente, es que nace la mecánica de la fractura, para analizar las condiciones o criterio de la rotura producida.

Esto es por la necesidad de la prevención frente al diseño estructural y su ocupación de materiales con menores factores de seguridad que se utilizan por un fin de ahorrar de presupuesto y/o material, conociendo qué condiciones son las que favorecen la propagación de estos defectos, hasta qué punto esta falla puede seguir creciendo sin generar un riesgo estructural, teniendo el conocimiento de estos parámetros es que se puede hacer un análisis crítico para disminuir los accidentes asociados a estos comportamientos.

Considerando lo anterior, es que se tienen dos grandes categorías según el comportamiento de los materiales, una de ellas se refiere a la mecánica de la fractura elástico lineal (MFEL) los cuales no desarrollan fases plásticas relativamente relevantes antes de la rotura y por otro lado la Mecánica de la fractura Elastoplástica (MFEP), que al contrario de la MFEL este si genera fase plástica y no se tiende a comportamiento lineal.

1.2.1. Mecánica de la Fractura Elástico Lineal (MEFL)

Cualquier movimiento relativo de las superficies de una fisura puede obtenerse como una combinación de movimientos, en específico son tres básicos, los cuales se detallarán a continuación

- Modos de falla

- Por medio de la figura se representan los modos de fractura de un defecto o fisura, siendo la más habitual la del modo I.
- -Modo I: La apertura se realiza con cargas de tracción en dirección perpendicular a la fisura.
- -Modo II: El desplazamiento se halla en el plano de la fisura y es perpendicular al borde principal de la fisura.
- -Modo III: EL corte se produce por el desplazamiento de las superficies paralelas al borde principal de la fisura.

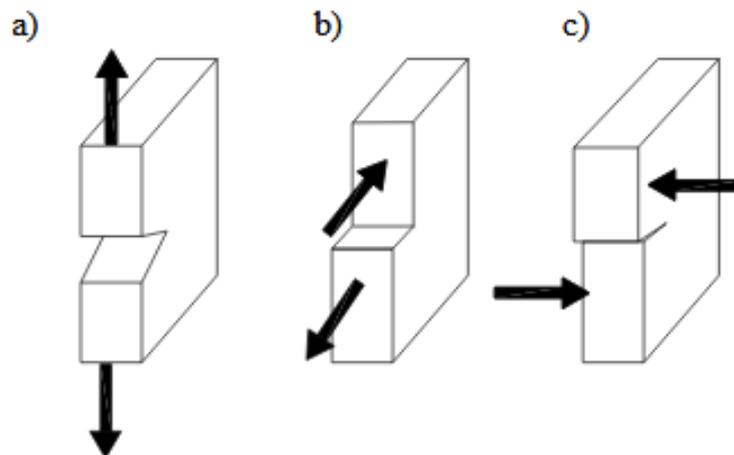


Figura 6. Modos de fractura: a) Modo I b) Modo II c) Modo III. (Ávila 2004)

- Factor de intensidad de tensiones

La intensidad del campo tensión-deformación elástico, el cual se encuentra localizado en las proximidades del extremo de la fisura, se puede describir por medio del “Factor de intensidad de tensiones (K), el cual según el Sistema Internacional de Medida se mide en $[MPa \times m^{(1/2)}]$, donde se considera el radio de la fisura (a) y la tensión de tracción (σ) para su cálculo, la cual viene expresada por la siguiente ecuación:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$$

Gracias a esta magnitud, se puede definir el estado de tensiones (σ_y) y desplazamiento (u_i) para todo punto de coordenada de la fisura (r, θ), exceptuando para el caso en que $r=0$ ya que

tiende a infinito, por lo que se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_y(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi a}} f_{ij}^I(\theta)$$

$$u_i(r, \theta) = \frac{K_I}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (1 + \nu) \xi_i^I(\theta)$$

Siendo única para el Modo I, ya que $f_{ij}^I(\theta)$ y $\xi_i^I(\theta)$ son funciones de la orientación propias del modo. Es así que también existe para los demás modos, sus respectivos factores de intensidad de tensiones K_{II} y K_{III} los cuales definen el estado tensional y desplazamiento solicitados en modo II y modo III

- Tenacidad a fractura

Este parámetro hace alusión a las características propias del material, siendo parte de la microestructura de ella, dado su contenido de micro huecos que pueden producir roturas locales, las cuales en cadena pueden crear situaciones críticas de rotura a un nivel global.

Siendo K_{IC} la medida de la resistencia del material a una rotura frágil, en deformación plana, es decir la tenacidad a la fractura en deformación plana, se puede utilizar para predecir la situación en la que ocurre una extensión apresurada de la fisura, y esto ocurre cuando el valor del Factor de intensidad de tensiones (K_I) logra alcanzar el valor de K_{IC} , provocando que la fisura se propaga de manera inestable o brusca.

La elección de la condición de deformación plana para definir la tenacidad a la fractura, se debe a mantener la seguridad en el diseño, y con esto poder establecer un mínimo crítico de desplazamiento, con el cual se verá representado el material independiente de la geometría de éste.

Cuando el parámetro descrito se incrementa sobre la tenacidad a fractura es que se produce una inestabilidad de la fisura y por la tanto la propagación de ésta.

$$K_I > K_{IC}$$

Es por esto que cuando ocurre esta igualdad es que se existe la posibilidad de la extensión de la fisura o es decir tiene un movimiento cuasi-estático

$$K_I = K_{IC}$$

Donde finalmente es que por temas de seguridad en todo momento se debe mantener la desigualdad, ya sea controlando el tamaño de la fisura o el esfuerzo externo al que se sea sometido.

$$K_I < K_{IC}$$

1.2.2. Mecánica de la Fractura Elastoplástica (MFEP)

Para este caso este tipo de mecánica analiza el comportamiento de elementos frágiles, donde el análisis que establece es dictado entorno al defecto, generando valores que tienden al infinito cuando este se acerca al borde.

La MFEP nace gracias a que existen una gran cantidad de materiales, los cuales en su mayoría son metales, difieren del comportamiento elástico lineal, donde las plastificaciones que pueden ocurrir frente a cargas son bajas en proporción con el comportamiento lineal inicial. Es así que esta mecánica se centra en aquellos que generan fases de altas ductilidades previas a la rotura lo que condiciona el comportamiento ante la rotura en el defecto a estudiar.

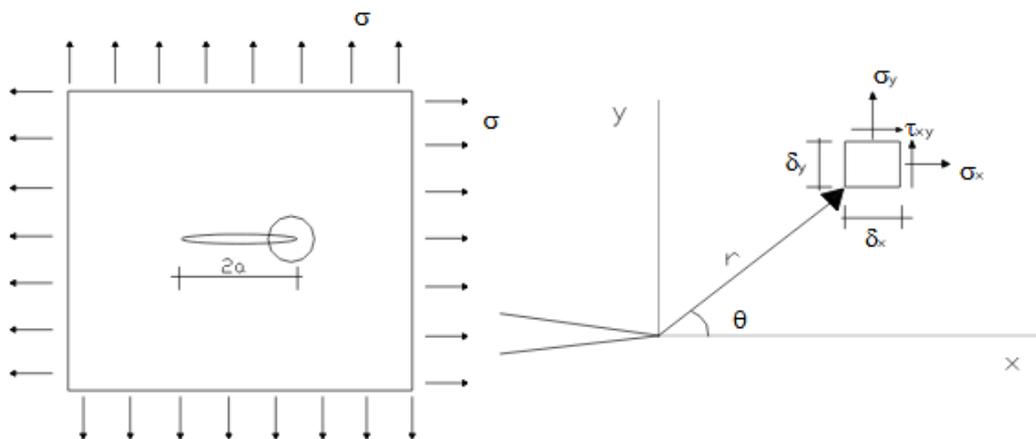


Figura 7. Campo de tensiones próximo a la punta de una grieta. (Ávila 2004)

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi a}} f_{ij}^I(\theta)$$

Como se puede notar en la ecuación anterior es que en la punta del defecto la tensión tiende al infinito, ya que por la singularidad $a = 0$ produce efecto de tensión y que se reduce gradualmente a medida que se aleja de la punta. Evidentemente, no es posible que ocurra, ya que el material al alcanzar su punto de fluencia, impide que este siga aumentando su tensión ya que empieza a sufrir deformaciones plásticas. Es así que la distancia hasta la cual se producen deformaciones plásticas, corresponde a un círculo de radio r_p^* , que se obtiene de la intersección de la tensión entre la tensión teórica y el límite de fluencia del material, es decir donde se encuentra el valor máximo de tensiones en condiciones elásticas σ_{ij} .

$$r_p^* = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ij}} \right)^2$$

Luego experimentalmente se ha demostrado que la distancia real de la zona donde se producen deformaciones plásticas es mayor. Es por esto que Irwin hace la corrección, ya que

se basa en asumir que la zona plástica es similar a la distancia de la fisura, ya que los desplazamientos aumentan y la rigidez disminuye, concluyendo en que es aproximadamente el doble del valor teórico mencionado, expresado de la siguiente manera:

$$r_p = 2r_p^* = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ij}} \right)^2$$

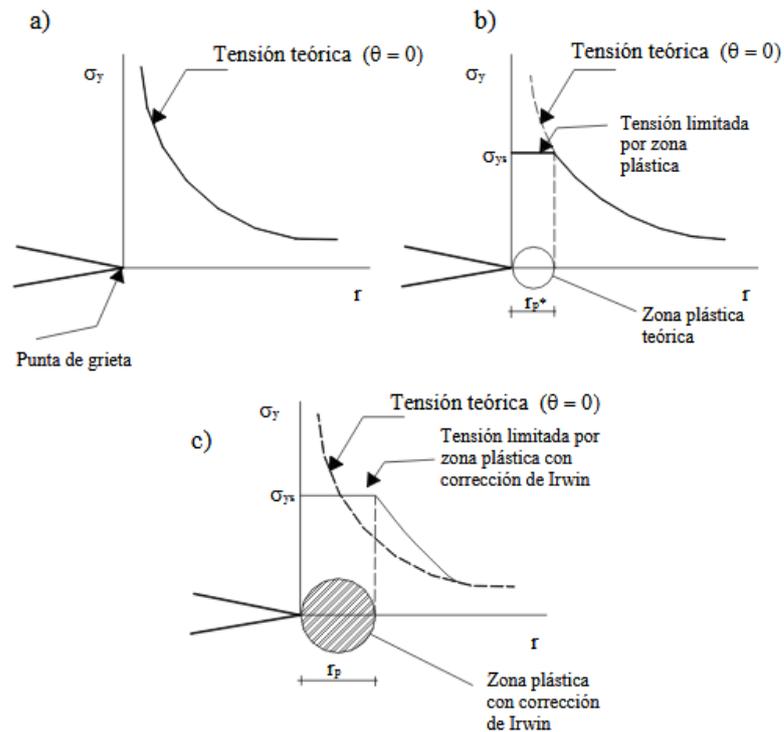


Figura 8. Zona plástica en la punta de una grieta: a) tensión teórica en un medio elástico b) zona plástica teórica próxima a la punta de la grieta c) zona plástica con corrección de Irwin (Ávila 2004).

1.3. TEORÍA DE LAS DISTANCIAS CRÍTICAS

Cuando se habla de la teoría de las distancias críticas (Taylor, 2007), estas se refieren al conjunto de teorías que se utilizan para predecir tensiones en el entorno de entallas y otros defectos concentradores de tensiones como arcos.

Es así que para poder utilizar esta teoría es que es necesario de dos parámetros, propio de cada material, siendo éstos la tenacidad a fractura (K_C) y la distancia crítica (L).

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_C}{\sigma_u} \right)^2$$



Teniendo la TDC es que es posible realizar las predicciones de cargas de rotura o de defectos máximos admisibles, por ejemplo, en arcos o circunferencias, los cuales, para efectos de este TFG se aplica directamente, ya que el estudio es sobre las tensiones de tracción que se forman al momento de aplicar carga hasta llegar la fractura por tracción.

Considerando la TDC es que existen 4 tipos de predicciones, que, junto con un análisis elástico lineal, es que estas se pueden llevar a cabo, donde dos de ellas se basan en las tensiones y las otras dos en el factor de intensidad de tensiones. En el primer caso se encuentra El Método del Punto (MP) y El Método de la Línea (ML), para el caso dos está El Método de la Fisura Imaginaria y La Mecánica de Fractura Finita.

Considerando los cuatro tipos de materiales a estudiar, es que se tienen como base los siguientes valores para el cálculo de predicciones de tensiones.

	(F)	(C)	(M)	(I)
Calculated K_{IC} (MPa·m ^{1/2})	0.37	0.73	1.14	0.74
Calculated L (mm)	3.79	3.39	6.19	2.33
Best fit of L (mm) – LM (fixed K_{IC})	9.95	3.99	6.01	–
Best fit of L (mm) – PM (fixed K_{IC})	3.66	2.30	2.85	8.81

Tabla 1. Valores L y K_C para Arenisca Floresta (F), Caliza Moleanos (C), Mármol Macael (M) y Mármol Carrara (I), (Justo, 2017)

Donde para este caso se utilizará el Método del Punto (MP), y con él verificar que los valores obtenidos en las pruebas sea lo más representativos para poder analizar y concluir.

1.3.1. Método del punto

En este método se realiza mediante un análisis elástico lineal y el fallo cuando la tensión es igual a σ_0 a una distancia r_c al frente de un arco o entalla a estudiar, es porque por medio de razonamientos teóricos es que se ha demostrado que esta distancia es $L/2$, es decir la mitad de la distancia crítica descrita en el enunciado anterior. Para casos de materiales cerámicos, compuestos y fatiga en metales σ_0 representa el valor de esfuerzo ultimo de rotura σ_u , mientras que en polímeros y otros metales puede llegar a tener valores más altos. Es así que el fallo se produce en:

$$\sigma\left(\frac{L}{2}\right) = \sigma_0$$

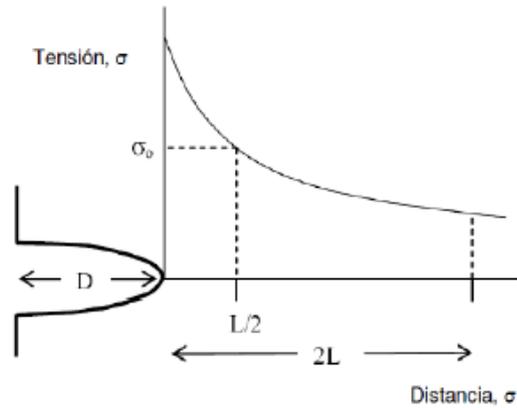


Figura 9. Curva tensión-distancia que se emplea para las teorías de distancias críticas, donde en el método del punto la fractura se produce cuando la tensión en la distancia de $L/2$ se iguala a la resistencia característica σ_0 (Escanciano, 2017)

2. **EQUIPOS, MATERIALES Y MÉTODO DE PREPARACIÓN**

2. EQUIPOS, MATERIALES Y MÉTODO DE PREPARACIÓN

Se presentan en este capítulo las consideraciones a tomar para la realización de la investigación, identificando los elementos de relevancia para su ejecución, además de los materiales y como estos se preparan para su correcta utilización.

2.1. EQUIPOS DE LABORATORIO

2.1.1. Prensa

Se utiliza para aplicar la carga uniaxial sobre las probetas de rocas. Dado que se tienen distintas resistencias, la prensa se puede equipar con dos tipos de celular de carga, de 15 [T] y 30 [T]. Se puede apreciar que la de menor carga tiene una sensibilidad mayor a las variaciones y lecturas durante el ensayo por lo que se utiliza para la “Arenisca Floresta”, por otro lado, la célula de 30 [T] que soporta mayor carga se utiliza para los demás materiales, debido a las propiedades mecánicas de las rocas, donde por bibliografía estos poseen mayores resistencias a la aplicación de cargas.



Figura 10. Prensa hidráulica, con celular de 30 [T]

Fuente. Imagen propia.

2.1.2. LVDT

Transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT), es un sensor eléctrico que se utiliza para medir el desplazamiento vertical al momento del ensayo. Este sensor nos entrega una referencia en tiempo real de cómo se van desplazando las probetas, lo que gráficamente por el ordenador se puede ir observando.



Figura 11. Transductor de desplazamiento con fijación magnético a prensa para el ensayo.

Fuente. Imagen Propia

2.1.3. Aparatos de frecuencia

Este equipo acondiciona las señales eléctricas producidas por los sensores del ensayo, tanto como las que genera cada célula de carga de 15 [T] y 30 [T], como las que genera el LVDT. Con esto es posible que la computadora, sea capaz de leer las señales para su interpretación.



Figura 12. Equipo de acondicionador de frecuencia.

Fuente. Imagen propia.

2.1.4. Geolab

Software que se utiliza en el ordenador asociado al ensayo, este programa es capaz de interpretar la señal eléctrica acondicionada, para entregar en tiempo real los datos necesarios de los distintos ensayos que es capaz de realizar, mostrándolos de manera gráfica.

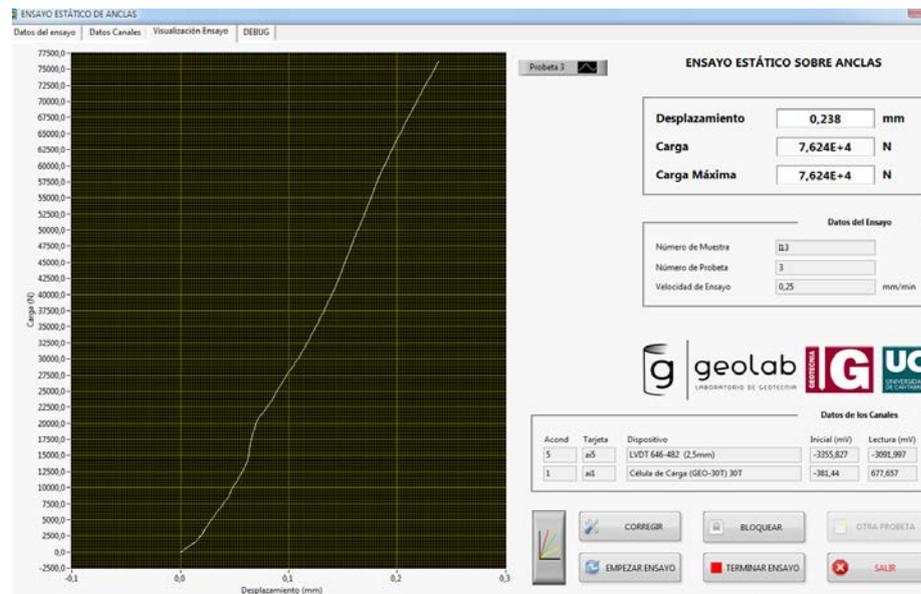


Figura 13. Software Geolab.

Fuente. Imagen propia.

2.2. MATERIALES PARA ESTUDIAR

Se detallan los distintos materiales para la realización de los ensayos, considerando su origen, características generales del tipo de roca, además de sus propiedades de resistencia y dureza, detallando parte de su uso y como estos se conforman.

Se ha de explicitar que, para reducir la posibilidad de distorsiones en cuanto a los resultados de ensayos, se seleccionaron 4 tipos litológicos o más bien tipos de rocas, en base a criterios de homogeneidad y uniformidad, para lograr una mejor comparación entre ellos al momento de seleccionar las muestras.

Siguiendo el criterio descrito desde el punto de vista litológico las rocas se distinguen entre dos grandes grupos, sedimentarias y metamórficas.

En primer lugar, en las rocas sedimentarias se encuentra según sus nombres comerciales, "Arenisca Floresta" y la "Caliza Moleanos", donde la arenisca es de las sedimentarias clásticas y la caliza del grupo de las no clásticas químicas.

Por último, se encuentran las rocas que pertenecen a las metamórficas, de carácter cristalino, “Mármol Macael” y el “Mármol Carrara italiano”.



Figura 14. Material de estudio

Fuente: Propia.

2.2.1. Arenisca Floresta

Caracterizando este tipo de roca, presenta un color beige de tono claro, que se mantiene homogéneo, la cual posee una gran calidad, pureza y de una estructura muy compacta, esto producto de su formación por arena cuarcífera consolidada y reestructurada con material cementante de origen calizo (Anon., s.f.).

Teniendo un 85% de cuarzo como mínimo, es una roca de carácter sedimentaria clástica, la cual posee una densidad aparente de 2340 [Kg/m³]. Está clasificada como sedarenita, al estar constituida principalmente de carbonatos y fragmentos de cuarzo, siendo de uso frecuente en la industria de la construcción, así como para elementos arquitectónicos, dada su gran facilidad de extracción y su abundancia.

El compuesto de sedimentos de tamaño arena varían entre los 2 [mm] y los 0,0625 [mm], donde la parte de carbonatos tiene una forma, en general, subredondeada, conformada por granos intraclásticos de tamaño medio, con textura arcillosa, granos esparíticos y dolomías.

La parte que se conforma de cuarzos son principalmente subredondeados, con una forma angular o subangular, donde se pueden encontrar tamaños de grano medio a muy finos.

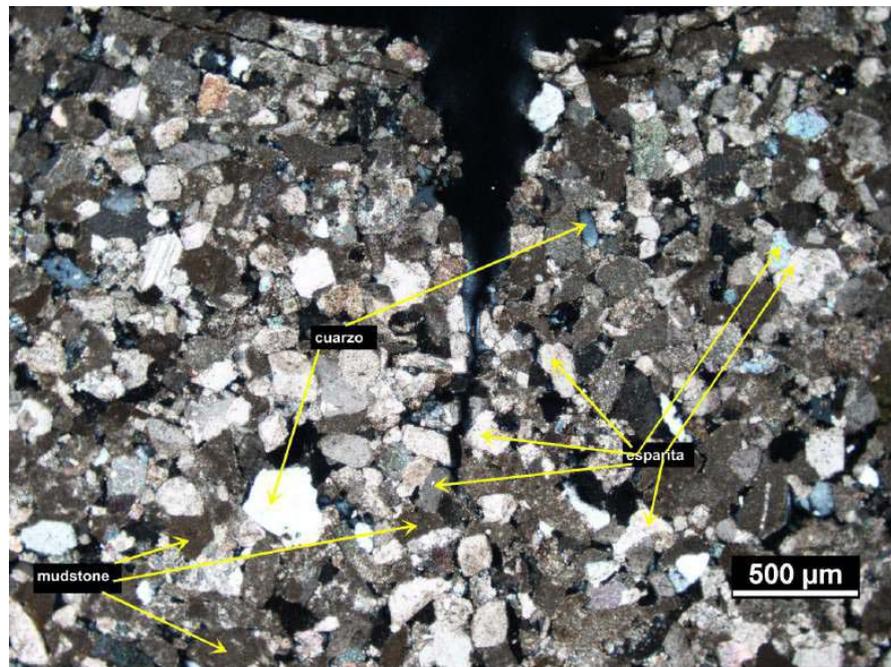


Figura 15. Arenisca Floresta, imagen de microscopio óptico (Escanciano, 2018)

Su uso frecuente en la construcción de fachadas, así como en pavimentos o en elementos decorativos se debe a su resistencia, calidad y sus buenas adaptaciones a las variaciones climáticas.

Ensayos Técnicos	NORMA	RESULTADOS
Densidad aparente	UNE-EN 1936:2007	2340 [Kg/m ³]
Porosidad abierta	UNE-EN 1936:2007	14,7 [%]
Resistencia a flexión	UNE-EN 12372:2007	8,2 [MPa]
Resistencia a la compresión	UNE-EN 1926:2007	41 [MPa]
Resistencia a la abrasión	UNE-EN 1341:2002	32,5 [mm]
Resistencia al choque térmico	UNE-EN 14066:2003	0,05 [%]

Tabla 2. Tabla de datos “Arenisca Floresta”, (Gonzales, 2020)

2.2.2. Caliza Moleanos

Siendo del tipo roca sedimentarias no clásticas químicas, con un color beige claro, donde presenta una leve tonalidad grisácea, estando formada por elementos ortoquímicos, es decir que un material carbonatado formado por precipitación química directa en la cuenca de sedimentación.

Proveniente de la localidad de Moleanos en Portugal, desde la cantera origen su extracción siendo de manera común en la zona, está limitada por el impacto ambiental que esta produce,

provocando así que su coste y stock sea siempre condicionado.

Se conforma por un grano de fino a medio y manchas parduscas. Gracias a su dureza media, su utilización a nivel comercial más frecuente es el revestimiento tanto para interiores como terminaciones de construcción, además de pavimentos y decoraciones.



Figura 16. Cantera de Caliza Moleanos.

Fuente. www.farpedra.com/canteras

La “Caliza Moleanos” está compuesta por intraclastos, pellets y cristales de esparita. Los intraclastos presentan una textura micrítica con una forma redondeada o subredondeada, donde su tamaño está dentro del rango de arena gruesa y microconglomerado. Los pellets siendo el elemento aloquímico dominante, es el agregado micrítico de forma subesférica que varía en tamaño de grano desde arena fina a mediana. Finalmente, los cristales de esparita cumplen con la función de unión del total de componentes aloquímicos, ya que constituye un cemento grueso y de color claro que aparece entre los espacios intragranulares.

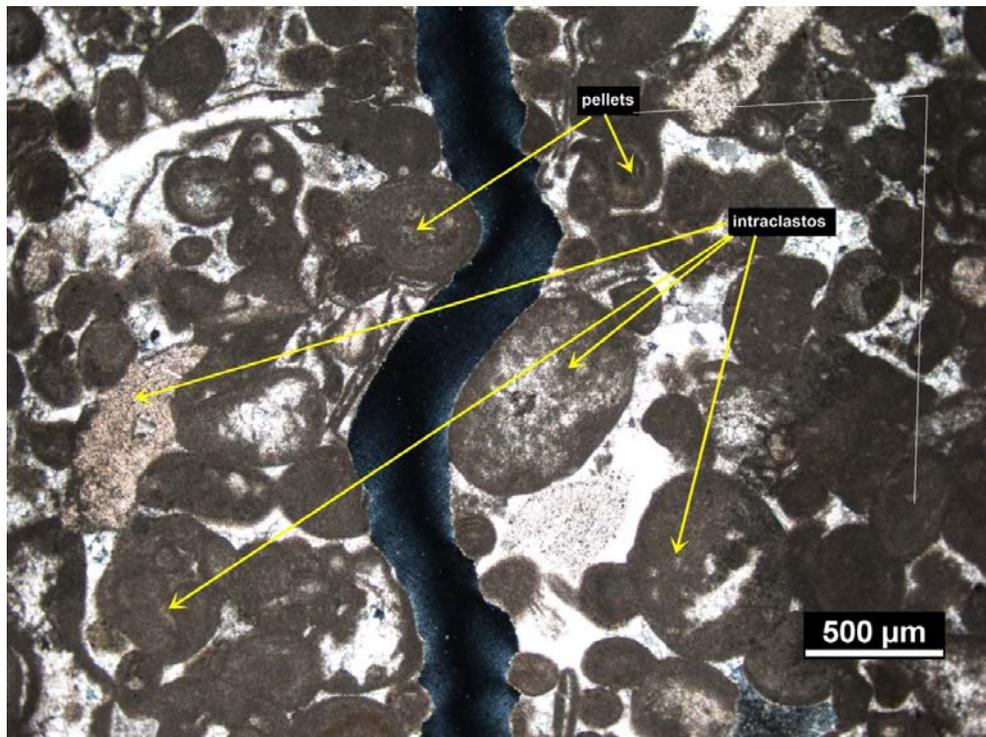


Figura 17. Caliza Moleanos, imagen de microscopio óptico, (Escanciano 2018).

2.2.3. Mármol Macael

Roca metamórfica procedente de la localidad de Macael, en Almería, siendo una cantera española donde el mármol que se extrae es de color blanco regular, de baja porosidad y compacto, además de un grano grueso lo que permite distinguir los cristales de gran tamaño a simple vista.

Esta roca se formó gracias a las elevadas temperaturas y presiones a que se someten los sedimentos, generadas por intrusiones volcánicas, provocando un mineral gruesamente cristalino donde su principal aporte es de calcita, opacos y cuarzo.

No presentan cavidades, por lo que muestran una porosidad nula, así como una textura granoblástica muy pronunciada, con los cristales idiomorfos leucocráticos equidimensionales, (Justo et al., 2017).

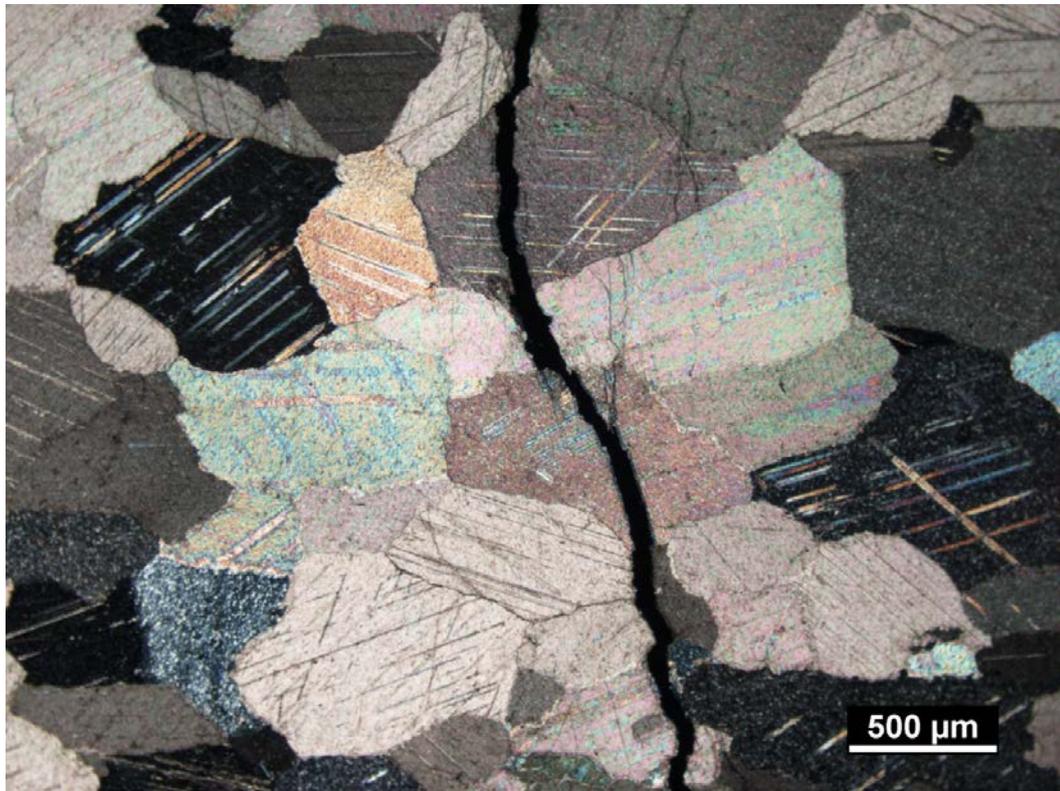


Figura 18. Mármol Macael, imagen de microscopio óptico, (Escanciano, 2018).

2.2.4. Mármol Carrara

Siendo de origen italiano, la cantera se ubica en los Alpes Apuanos, en la comuna de Carrara en la región de la Toscana, siendo una roca metamórfica esta de un color blanco intenso y escasas vetas. Teniendo el mismo control en su tiempo de extracción y explotación que las rocas descritas como la “Caliza Moleanos” y el “Mármol Macael”, debido al impacto ambiental que se pueden provocar, es que su valor y disposición sean condicionados.

Tiene una gran dureza y resistencia lo que su uso comercial se ve favorecido en el ámbito estético como decorativo.



Figura 19. Mármol Carrara

Fuente. Valeria Strambi.

Presenta una textura granoblástica muy desarrollada, donde los cristales idiomorfos leucocráticos forman un mosaico de granos más o menos equidimensionales. Al igual que en el caso del mármol Macael, la porosidad que tiene lugar es nula, siendo la diferencia más significativa entre ambos el tamaño del cristal (Escanciano, 2018).

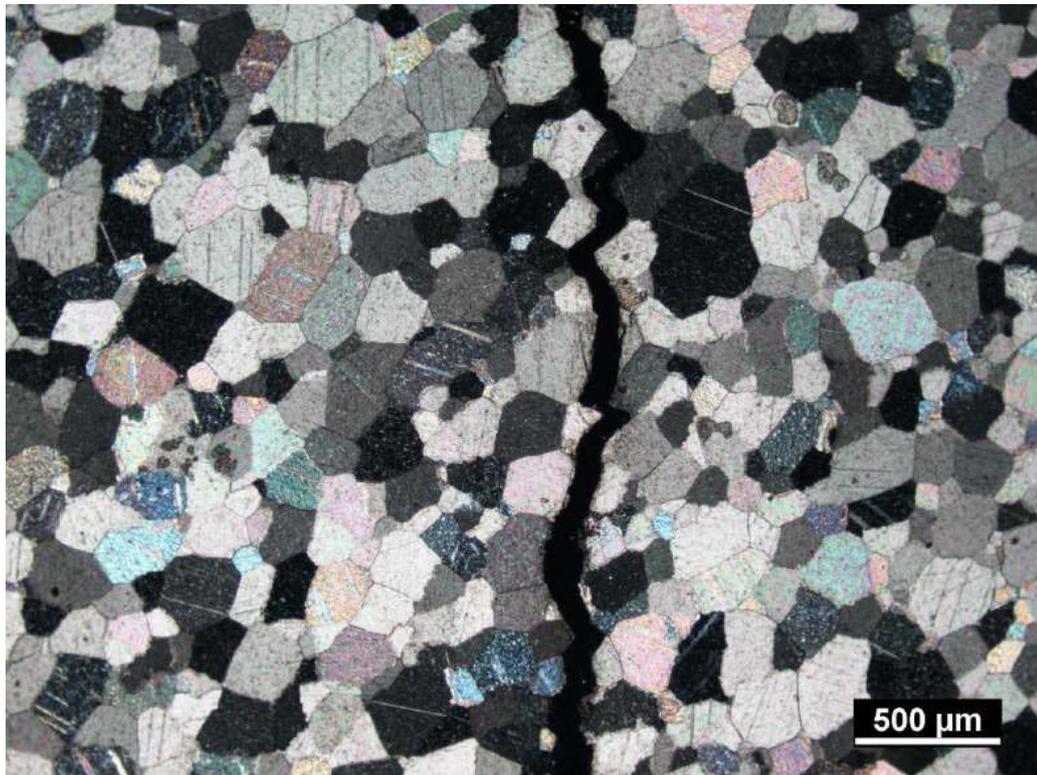


Figura 20. Mármol Carrara, imagen de microscopio óptico (Escanciano, 2018)

2.2.5. Información mecánica

En el presente capítulo se comentará sobre las características mecánicas de las rocas que se tienen en estudio, es por esto que por medio de bibliográfica se tienen las siguientes consideraciones para dar un mejor entendimiento de la información base para el estudio. Es por esto que se consideran los siguientes materiales de roca, Arenisca floresta (F), Caliza Moleanos (C), Mármol Macael (M) y Mármol italiano Carrara (I), los cuales presentan a continuación se presentan algunos datos técnicos de los materiales:

	(F)	(C)	(M)	(I)
Bulk density (kg/m ³)	2320	2500	2715	2709
Open porosity (%)	16.3	6.4	–	–
Water absorption (%)	4.8	2.7	0.075	0.15
Abrasion resistance (mm)	31	20	22.25	2.65

Tabla 3. Propiedades técnicas de cada material de estudio, (Justo et al., 2017).

En cuanto a las propiedades mecánicas de las rocas se tienen a continuación los siguientes datos.

	(C)	(F)	(I)	(M)
Compressive strength, σ_c [MPa]	78,8	50,4	97,8	86,6
Young's modulus, E_{50} [GPa]	38,4	19,6	57,1	73,4
Poisson's ratio, ν	0,27	0,24	0,23	0,28
Tensile strength, σ_u [Mpa]	7,08	3,38	8,69	8,15

Tabla 4. Características mecánicas de cada material, (Justo et al., 2017).

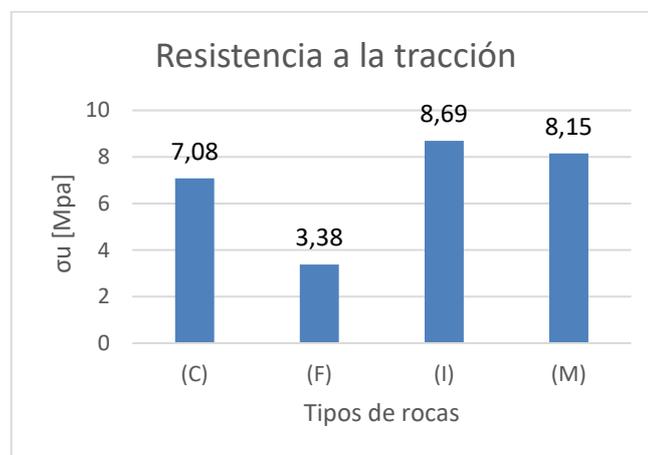


Figura 21. Grafico Resistencia a tracción por ensayo brasileño por cada roca.

Fuente: elaboración propia.

2.3. MÉTODOS DE PREPARACIÓN

El acondicionamiento de las probetas para este ensayo es de bajas proporciones, ya que estas siendo un remanente de la extracción de las probetas cilíndricas para ensayos de compresión simple, ya vienen condicionadas por la perforación que se realizó con una broca adiamantada de 57 [mm], lo más centrada posible dentro de la probeta prismática, con un largo promedio de 150 [mm].

Con el largo disponible de la probeta prismática, se procede a realizar el cálculo del largo para el corte óptimo para el ensayo, es por esto que, considerando el campo de tensiones alrededor de un agujero, es que se espera que las tensiones principales horizontales se establezcan a partir de una distancia especificada, porque se debe analizar el ensayo cuando el material se encuentre en condiciones de una deformación plana para poder realizar una prueba representativa del material.

Teniendo las dimensiones óptimas para su utilización (55 mm), no es posible disponer de



ellas, ya que por temas de maquina al momento del corte, este solo es capaz de realizar cortes máximos de 40 [mm], por lo que se dispone a realizar esta como la medida óptima para todas las probetas (teniendo en cuenta que las diferencias son pequeñas).

Por otro lado, teniendo a disposición de un largo de 150 [mm] promedio, por cada bloque de material se extraen 3 probetas para el ensayo, eliminando con la sierra, aquellas caras poco prolijas o con imperfecciones que existan previamente por la extracción de la probeta cilíndrica.

Con las probetas con sus dimensiones determinadas, se realizan marcas para indicar ejes verticales y horizontales con el fin de que al momento de ocupar la prensa estas queden centradas en referencia al punto de carga.

En último lugar se procede a recubrir sus caras que irán en contacto con la base y con la prensa, con vaselina para reducir la fricción que existe entre ellos y así permitir que la probeta tenga un libre desplazamiento horizontal al momento de iniciar con las cargas, es decir que no exista rozamiento en la base para que la probeta deforme libremente en los ejes horizontales.

3. MODELACIÓN NUMÉRICA

3. MODELACIÓN NUMÉRICA

Teniendo a la tecnología como herramienta para poder recrear situaciones de la realidad, como son las estructuras, o situaciones donde es necesario la utilización de conocimientos geotécnicos para resolución de problemas, es que aparece Plaxis 2D y Plaxis 3D, de la compañía Bentley, la cual por medio de análisis por elementos finitos es capaz de modelar problemas reales con todas las características que sean necesarias para aumentar su precisión para determinar reacciones, cargas, deformaciones, y en nuestro estudio tensiones internas en los materiales.

3.1. MODELACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES EN PLAXIS 2D

En un comienzo de la investigación de las cavidades en roca, es que se pensó que se analizara la variación de las secciones transversales, tanto en sus dimensiones como el cambio del diámetro de la cavidad perforada para la elección de la probeta. Donde que a pesar que se realizó su modelación, finalmente se decidió la ocupación de las probetas existentes para su aprovechamiento y la orientación de la carga uniaxial para aquellas probetas no cuadradas.

Estas probetas no son simétricas entre ellas, ya que por sección trasversal no tienen las mismas dimensiones siendo así, se tiene solo una con sección cuadrada que sería la de "Arenisca Floresta", la cual se identifica con la "F" y el número de la probeta inicial antes de cortar, la numeración se relaciona al banco de probetas con cavidades que se tiene en laboratorio, el cual es distinto para cada roca. En cuanto a las que no son cuadradas, se tiene la "Caliza Moleanos" con una de sus lados de 110 [mm], que se identifica con la letra "C" y al igual que la arenisca acompaña del número de la probeta (17), para el "Mármol Macael" y "Mármol Carrara", se tiene una similitud en sus lados con 120 [mm], con letra identificadora "M" e "I" respectivamente, y al igual que las demás con el número de la probeta seleccionada dentro de las disponibles.

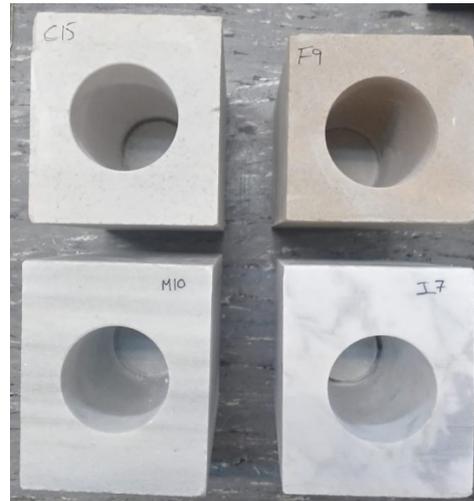


Figura 22. Secciones transversales para elección de probetas de rocas.

Fuente. Imagen propia.

Tabla de secciones	Diámetro [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]
Arenisca Floresta	57	100	100
Caliza Moleanos	57	100	110
Mármol Macael	57	100	120
Mármol Carrara	57	100	120

Tabla 5. Dimensiones de secciones transversales de probetas de rocas.

Fuente. Elaboración propia.

Sabiendo la sección transversal de las probetas, es que estas se proceden modelar por medio de elementos finitos en Plaxis 2D, por lo que se establecen las consideraciones para su elaboración.

Se utilizaron los valores de las propiedades mecánicas detalladas en el capítulo anterior, en el punto 3.5.2 Información mecánica, despreciando el valor del peso propio del material, ya que su influencia en el modelo en relación al tamaño de la probeta a evaluar, está teniendo un máximo de 120 [mm] de alto, no es relevante para el valor mínimo que representa. Por otro lado, el criterio de cálculo, como se ha mencionado anteriormente en el capítulo de estado del arte, es que las tensiones y deformaciones frente a las solicitaciones serán elástico-lineal, por el comportamiento que presenta las rocas, cuasi-frágil.

Se considera una placa rígida en la parte superior de la probeta para recrear la uniforme repartición de la carga de 1 [KN/mm/mm] durante el ensayo, dado que será lineal, luego se puede extrapolar el valor de tensiones a la carga de rotura real a la que se produzca. Esta

placa para que no influya en los resultados se incorpora con una rigidez alta, valores muy superiores a la del material más rígido que sería el Mármol Carrara con 66,9 [GPa], teniendo un mínimo de 1×10^5 [GPa], valores que evitan deformaciones frente a la carga.

En cuanto a la base se establece la libre deformación lineal en el plano horizontal así teniendo rozamiento cero, manteniendo un punto rígido para que no se convierta en un mecanismo.

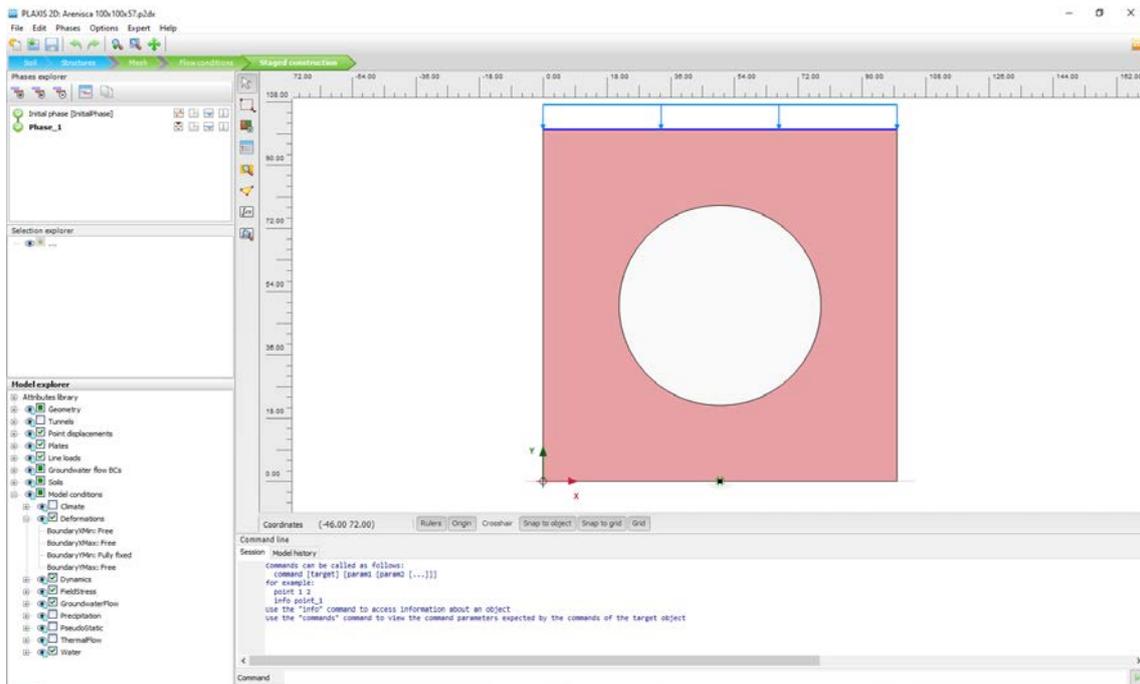


Figura 23. Modelo de probeta en Plaxis 2D.

Fuente. Elaboración propia.

Tanto para Plaxis 3D y 2D, la validez de la malla a utilizar necesita una comprobación previa a la realización de los análisis tensionales, por lo que se procede a realizar la modificación del número de elementos de esta.

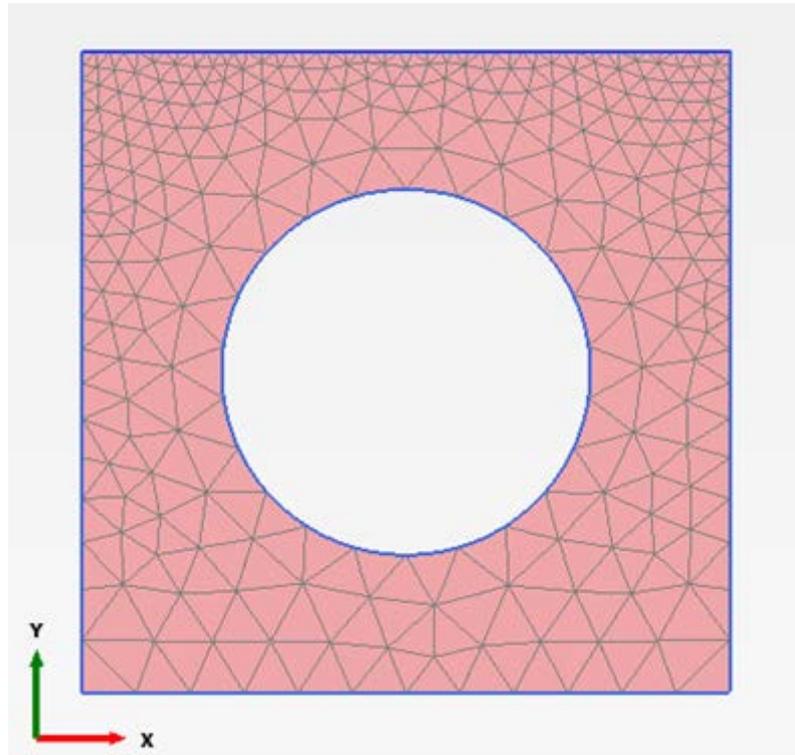


Figura 24. Malla generada para análisis en Plaxis 2D

Fuente. Elaboración propia.

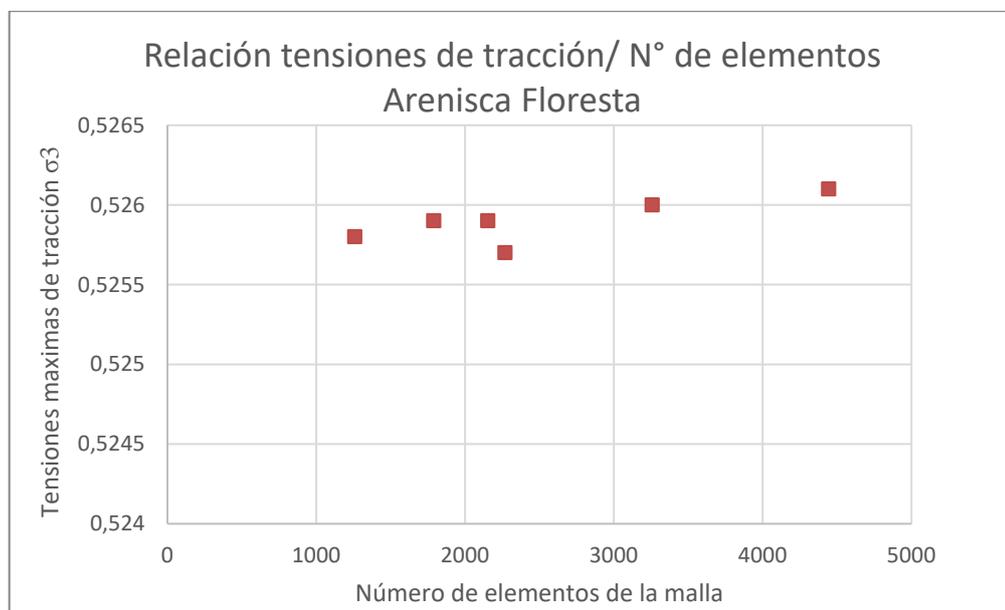


Figura 25. Relación número de elementos y valores de tensiones principales horizontales Plaxis 2D

Fuente. Elaboración propia.

Dado que la media de los resultados obtenidos en la revisión de la variación de datos, es que obtuvo un promedio de tensión máxima horizontal de 0,526 [KN/mm/mm], para el caso de la Arenisca Floresta, que corresponde a un factor de groso de malla de 0,6, por lo que se adopta este para el cálculo de todos los modelos realizados en el Plaxis 2D.

3.1.1 Estudio de orientación de las probetas

Por medio de la modelación numérica en Plaxis 2D, se puso a prueba la diferencia entre aplicar la carga a las probetas que no son cuadradas, evaluándolas por su lado de mayor y menor longitud, haciendo hincapié en la generación de los campos de tensiones de tracción, los cuales se revisan por eje vertical de la cavidad. Es así que se revisa las tracciones máximas que se tengan por modelo lo cual se puede ver la comparación en las siguientes figuras (26):

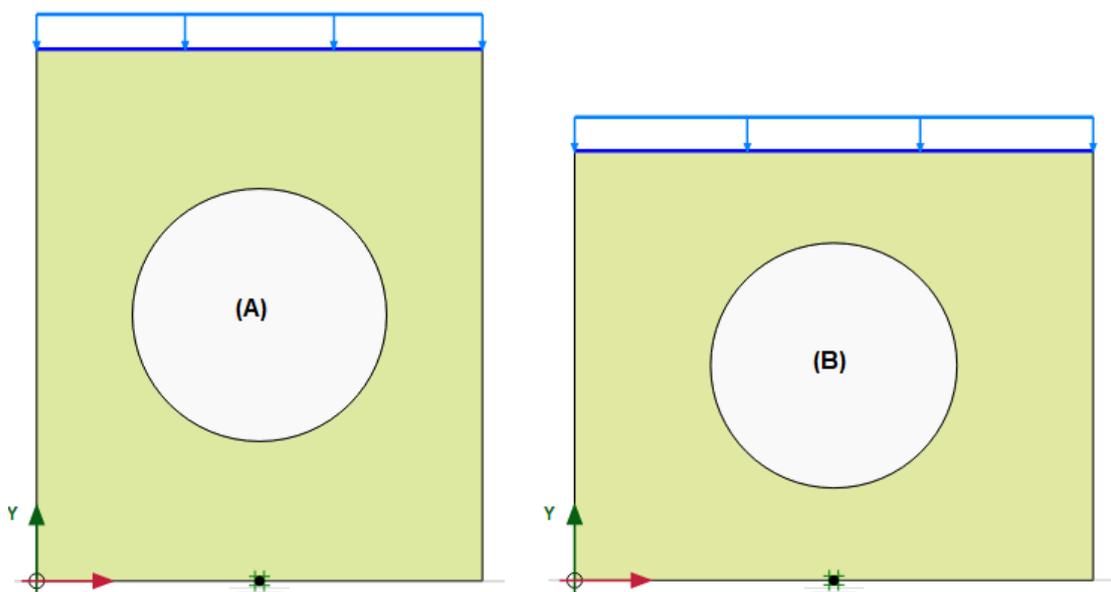


Figura 26. (A) Disposición vertical de probeta de “Mármol Macael”. (B) Disposición horizontal de probeta de “Mármol Macael”.

Fuente: Elaboración

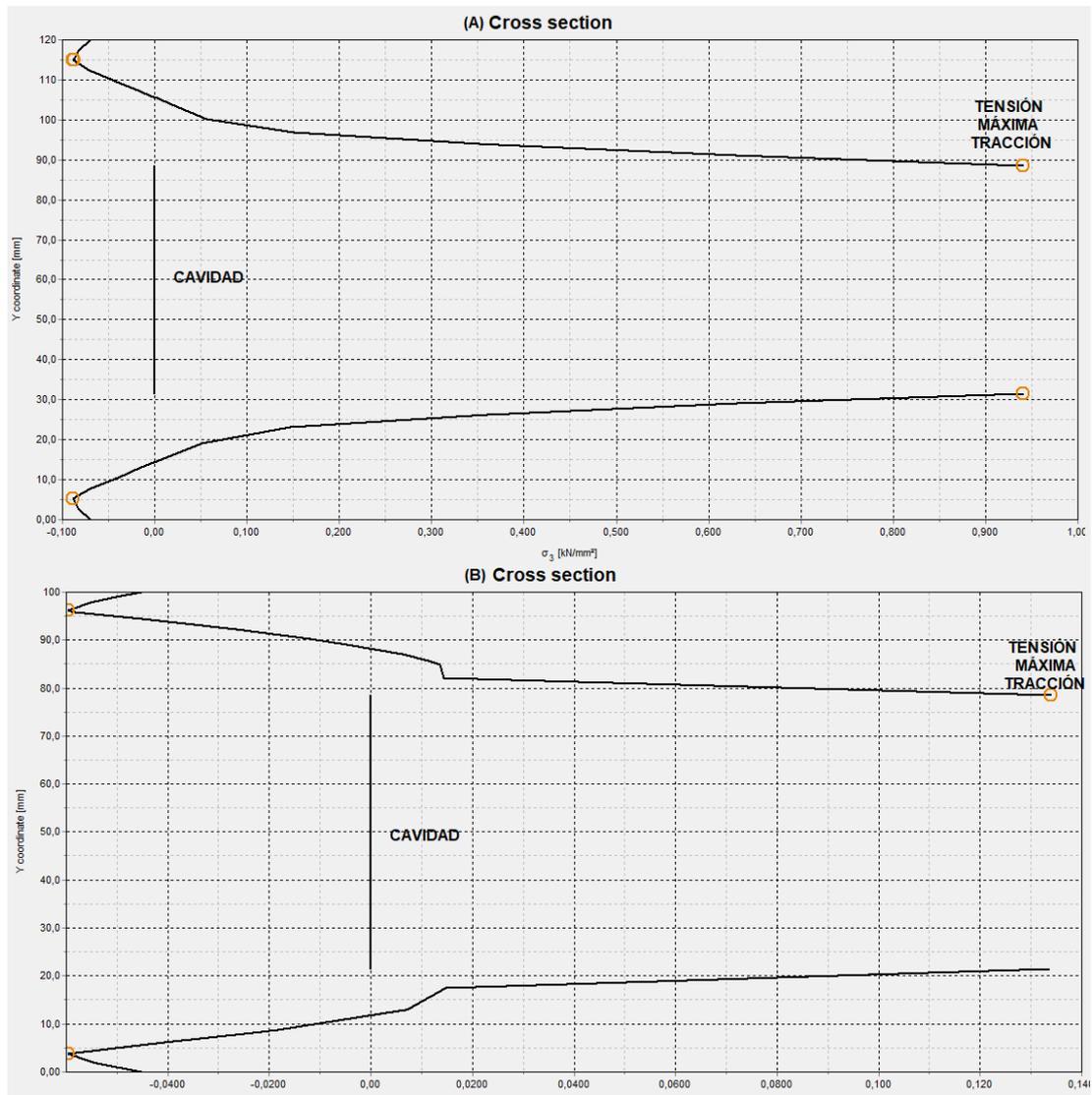


Figura 27. Tensiones principales horizontales por el eje vertical de la cavidad, “Mármol Macael”, (A) Lado mayor en vertical (B) Lado mayor en horizontal.

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la figura se tiene los siguientes valores de tensiones máximas de tracción para cada caso:

-(A) Vertical: 0,94 [KN/mm²]

-(B) Horizontal: 0,14 [KN/mm²]

Por lo que se decide tomar la probeta de manera vertical, para el óptimo desarrollo de las tensiones de tracciones, esta al ser mayor que la que se produce en su disposición horizontal. Con la ventaja que al momento del ensayo en laboratorio la cavidad sufra la rotura por la mayor tensión en la cavidad.

3.2. ESTUDIO DE ESPESOR DE PROBETA POR PLAXIS 3D

Teniendo determinado las secciones transversales con el punto anterior, es que ahora se procede a la determinación del largo de las probetas, por lo que se obtiene por la modelación de una carga unitaria de 1 [KN/mm²] aplicada verticalmente, tal cual se estableció para la modelación en 2D, donde se mantiene los mismos parámetros mecánicos de las rocas y las características de las condiciones de borde, solo que, al tener una dimensión extra, es que se irán analizando la variación del largo de esta.

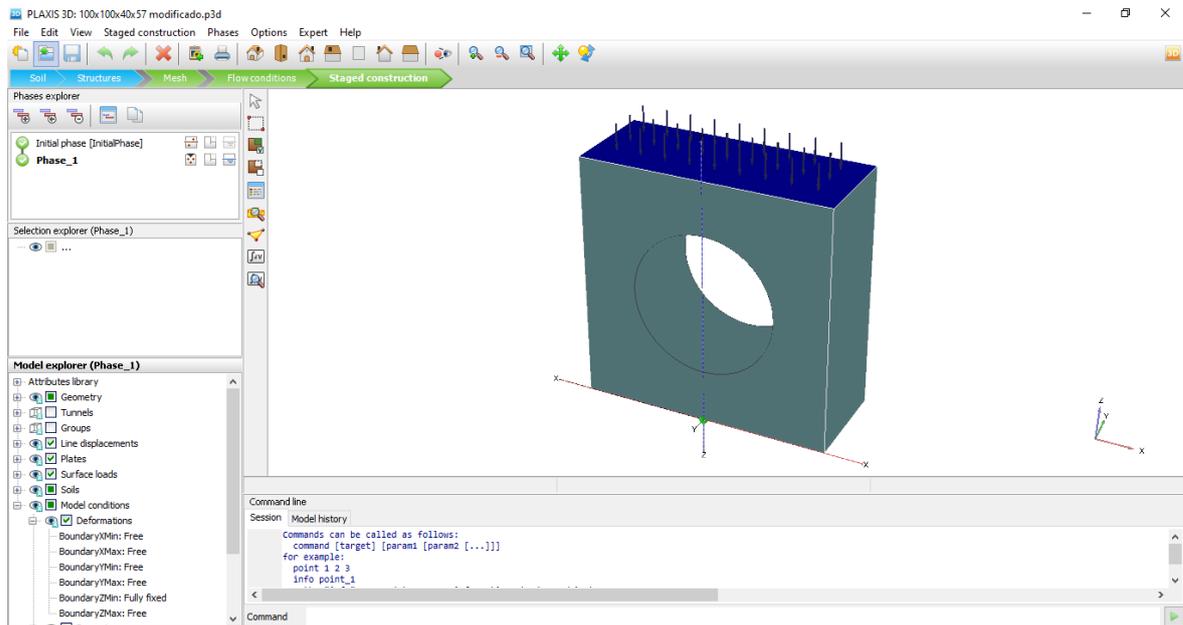


Figura 28. Modelo de probeta en Plaxis 3D

Fuente. Elaboración propia

Para decidir cuál sería el largo óptimo para las probetas, es que se espera que se produzca la estabilización de las tensiones máximas que se distribuyen en la cavidad, siendo las tensiones de tracciones, las cuales en Plaxis se denotan por tener valores positivos por el convenio de signos, ya que la fractura de la roca se produce primero por tracción al tener una menor resistencia en ese ámbito. Al determinar la distancia donde empieza a ocurrir el fenómeno descrito, es que se empieza a producir a su vez la deformación plana de la cavidad, es decir es el largo mínimo de la probeta, para representar las tensiones reales que se pueden obtener en un contexto real, como la de un sondaje. Lo que concluye que el análisis se realiza en torno a la cavidad, específicamente por el centro como lo muestra la Figura 29. El análisis de variación de las distancias se puede apreciar en el capítulo de Anexos lo que aquí se presentaran resultados últimos.

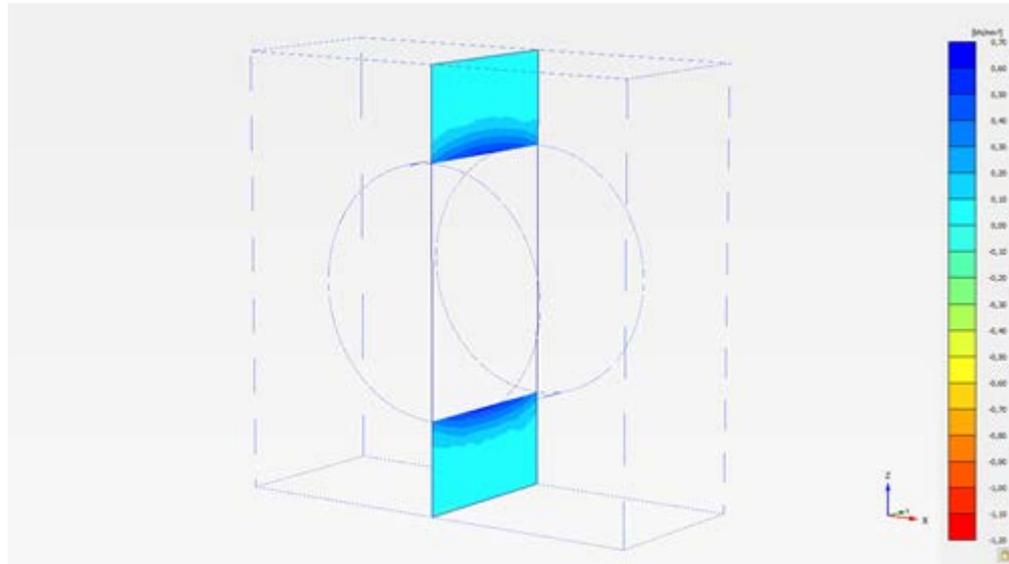


Figura 29. Zona donde se ubican las tensiones máximas de tracción.

Fuente. Elaboración propia

Dado que en Plaxis 3D para analizar la estructura del modelo, debe contener un número de elementos para analizar, es que se puede ir variando, para afinar su proximidad a los valores reales. Este número de elementos es la que contiene la malla de elementos finitos del modelo, por lo que disminuir el grosor de la malla, aumenta el número de elementos, por lo que podría variar los resultados obtenidos, esto se realiza cambiando el factor del grosor de esta, que inicialmente es 1, lo que al bajar se produce el efecto descrito, es por esto que se realiza una comprobación al modificar el número de elementos de la malla para así verificar cual es la variación numéricamente de las tensiones resultantes frente a la carga unitaria, que en este caso se realiza con el modelo de la "Arenisca Floresta" y los valores de tensiones principales horizontales en el borde superior de la cavidad.

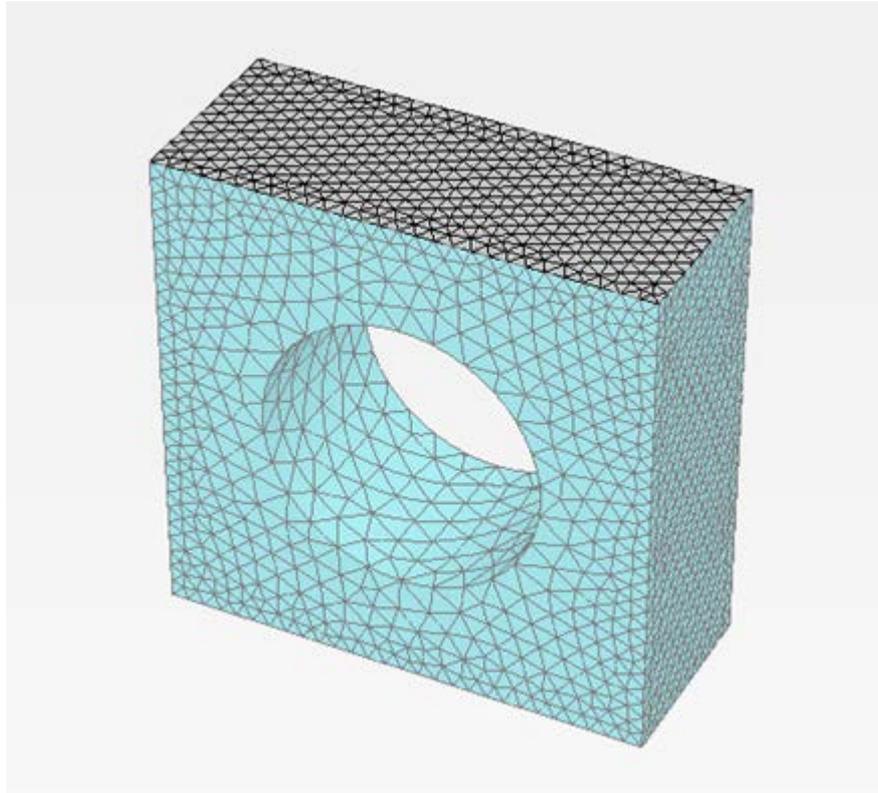


Figura 30. Malla generada para análisis en Plaxis 3D

Fuente. Elaboración propia.

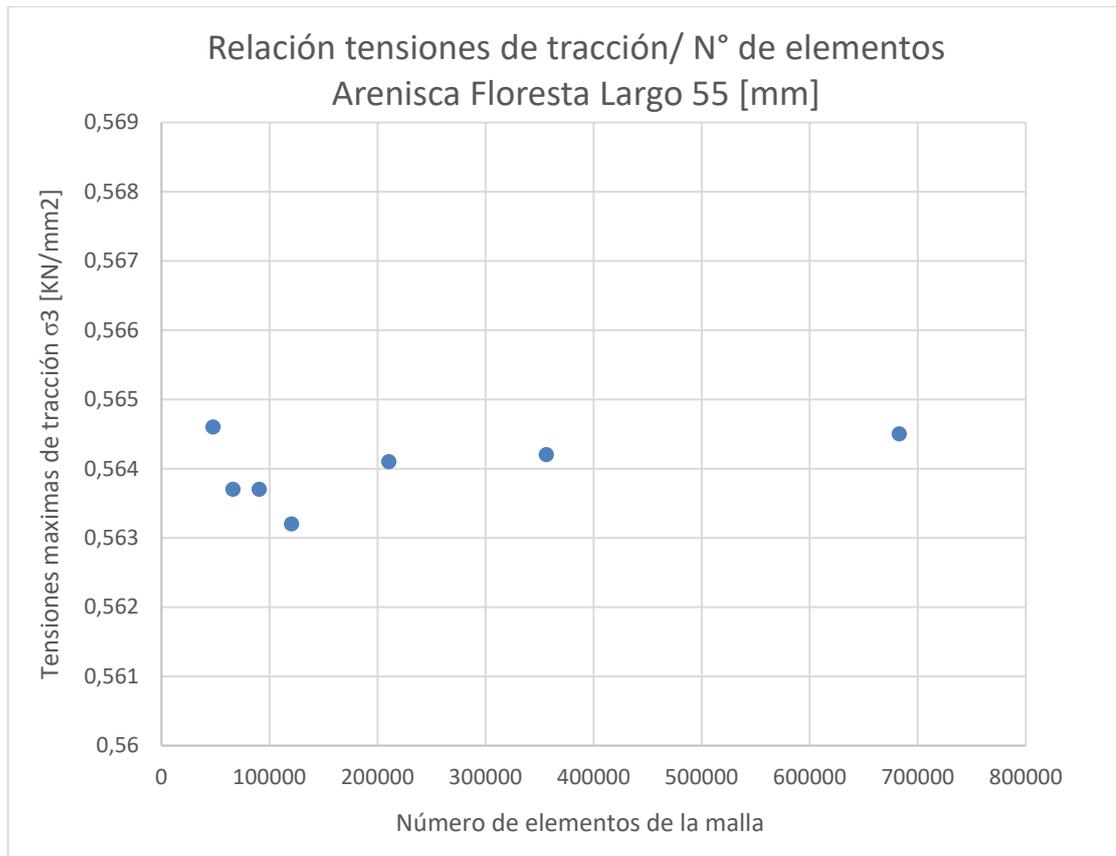


Figura 31. Relación número de elementos y valores de tensiones principales horizontales Plaxis 3D.

Fuente. Elaboración propia.

Dada que las dimensiones de las probetas no son de gran envergadura, al afinar la malla la variación valórica de las tensiones no es significativa ya que el promedio calculado de las tensiones es de 0,564 [KN/mm²], valor que se asemeja al menor número de elementos en la gráfica, pero no quiere decir que ocurra lo mismo en el caso que el análisis sea en una estructura de mayor complejidad, por lo que se asume el valor por defecto del grosor de la malla con valor 1.

Sabiendo la precisión del cálculo se procede a realizar el análisis, por lo que se grafica la relación que se va obteniendo de las tensiones de tracciones máximas que se van desarrollando a medida que los espesores van aumentando. Con esto es posible identificar el momento exacto donde las tensiones comienzan a estabilizarse

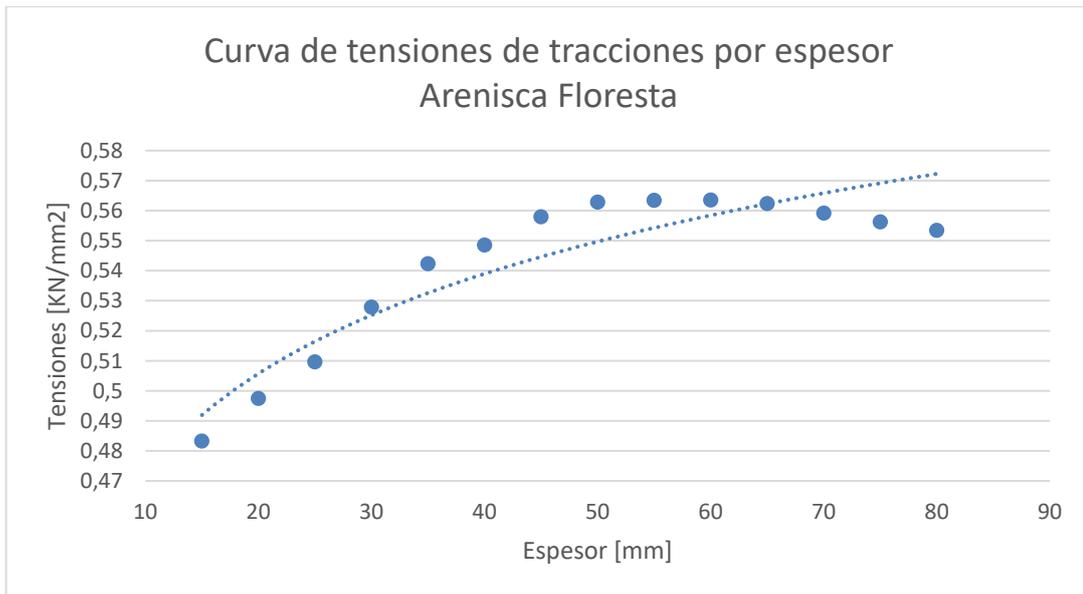


Figura 32. Relación tensiones de tracciones máximas en función del aumento del espesor.
“Mármol Macael”

Fuente. Elaboración propia.

Se puede apreciar que a partir del espesor de 50 [mm] para el “Mármol Macael” se aprecia la estabilización de los datos, donde se revisan variaciones en el tercer decimal de la tensión de tracción, por lo que se decide que a partir de este espesor se produce la deformación plana esperada.

El mismo análisis se realiza para las demás rocas concluyendo en:

	Diámetro [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Largo [mm]
Arenisca Floresta	57	100	100	55
Caliza Moleano	57	100	110	55
Mármol Macael	57	100	120	50
Mármol Carrara	57	100	120	50

Tabla 6. Dimensiones óptimas para obtener deformación planta al momento del ensayo.

Fuente. Elaboración propia

Como fue descrito en el capítulo anterior a pesar de tener las dimensiones para obtener la deformación plana, las cuales en la tabla 6 se denotan, no fue posible ocupar las dimensiones por lo que los análisis se realizan a partir de los modelos de con los valores de largo 40 [mm].

3.3. ESTUDIO DE ESTADOS TENSIONALES

Para partir hablando del estudio es que se tomaran en cuenta los modelos realizados inicialmente en Plaxis 2D, donde se identificaran las zonas máximas de tensiones verticales y horizontales, para así definir sus valores y analizar su comportamiento frente a la carga descrita anteriormente, valores que se pueden extrapolar a la carga real luego del ensayo.

Es así que se obtiene gráficamente por mapa de colores, las zonas donde existen y se producen las máximas tensiones, como lo muestra la Figura 33, donde se aprecian las tensiones totales principales horizontales $[\sigma_3]$, las cuales al tener valores positivos estos son, por convenio de signos, valores de tracción, teniendo un valor mayor que las negativas que son de compresión.

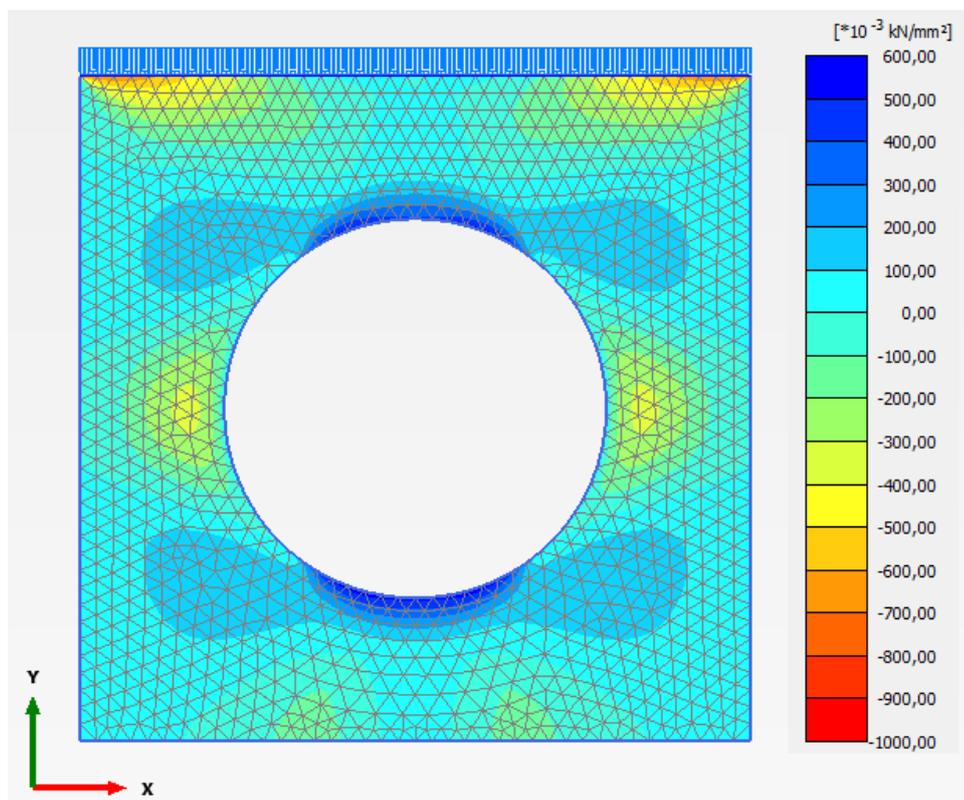


Figura 33. Mapa de tensiones principales horizontales en probeta de Arenisca Floresta en Plaxis 2D.

Fuente. Elaboración Propia.

Teniendo la precisión de datos realizada, es que se deben detallar los valores obtenidos de la carga sobre los modelos realizado. Es por esto que partiremos graficando la comparación de las tensiones en las zonas de tracción máximas, como lo expresa la figura 34 (Tensiones de tracción), las cuales como se ha dicho en capítulos anteriores serán las de mayor relevancia,

por lo que las demás tensiones se graficarán de modo informativo para indicar sus valores máximos y su posición.

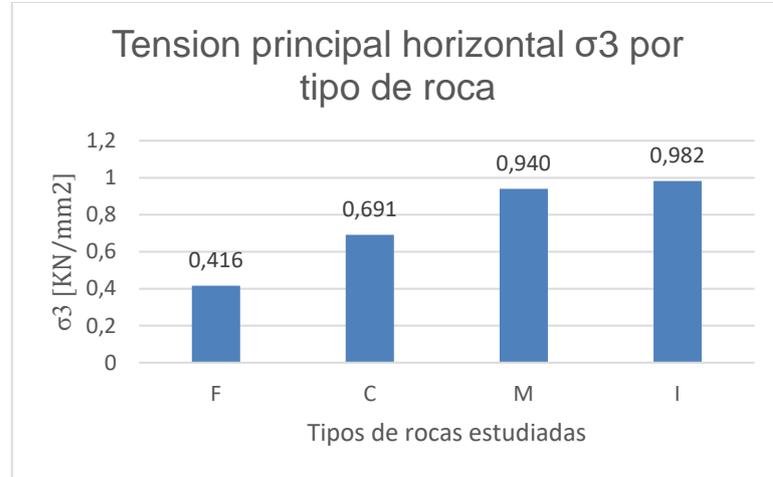


Figura 34. Gráfico de tensiones de tracción Plaxis 2D para cada tipo de roca

Fuente. Elaboración propia.

Del análisis realizado se pudo apreciar la distribución y crecimiento de las tensiones horizontales de tracción que se producen a lo largo del eje vertical de la cavidad, es así que se muestra en la figura X para dar una representación de este desarrollo, donde se aprecia la simetría del comportamiento de la cavidad frente la carga aplicada, por lo que se espera de igual manera al momento de realizar el ensayo en el laboratorio el mismo comportamiento.

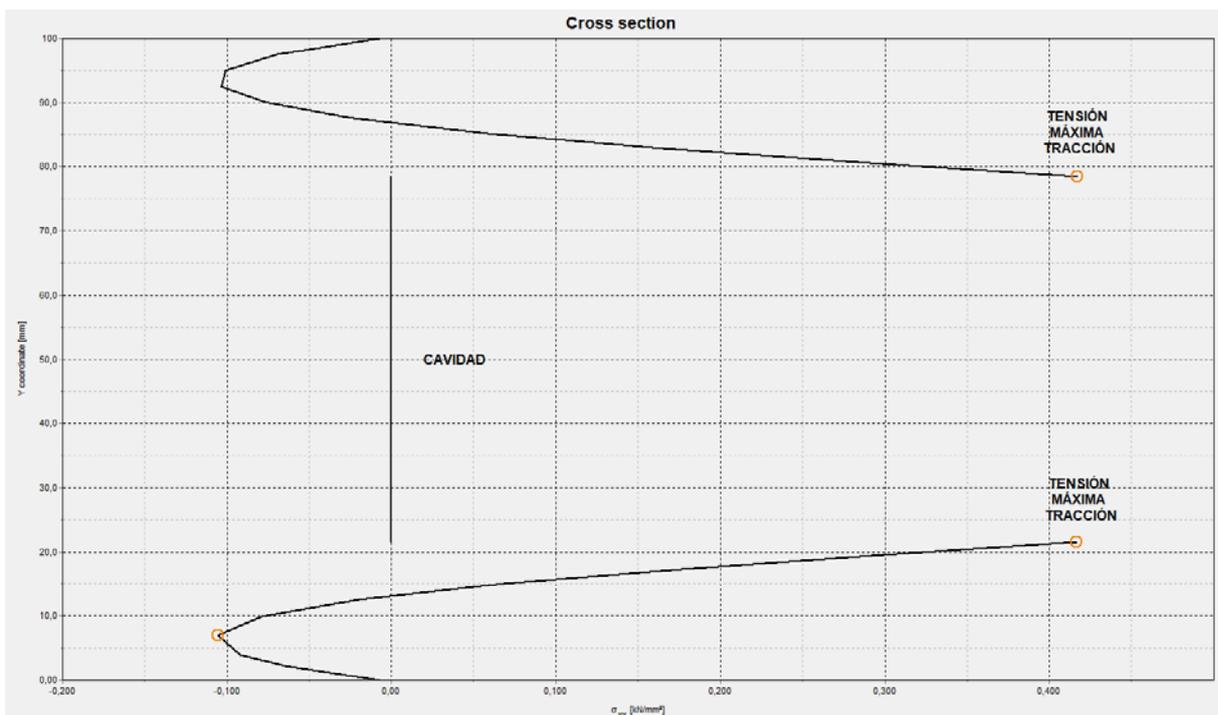


Figura 35. Gráfico de tensiones totales principales horizontales (σ_{xx}) en Arenisca Floresta en una sección vertical, donde se aprecian valores positivos dando la respuesta de que existen solamente tracciones.

Fuente. Elaboración propia.

Como se aprecia en la gráfica de tensiones, el crecimiento inicial no es del todo simétrico, esto es porque la carga aplicada genera compresiones verticales cerca de los bordes de la probeta, no de gran tamaño en comparación con las que se generan por eje horizontal de la cavidad, pero aun así influyen para que la tracción no se desarrolle del todo. Estas proceden a ir desapareciendo al momento de ir aproximándose a la cavidad, la cual influye en ellas transformándolas en tracciones verticales, por la debilidad que genera la falta de material al recibir la carga.

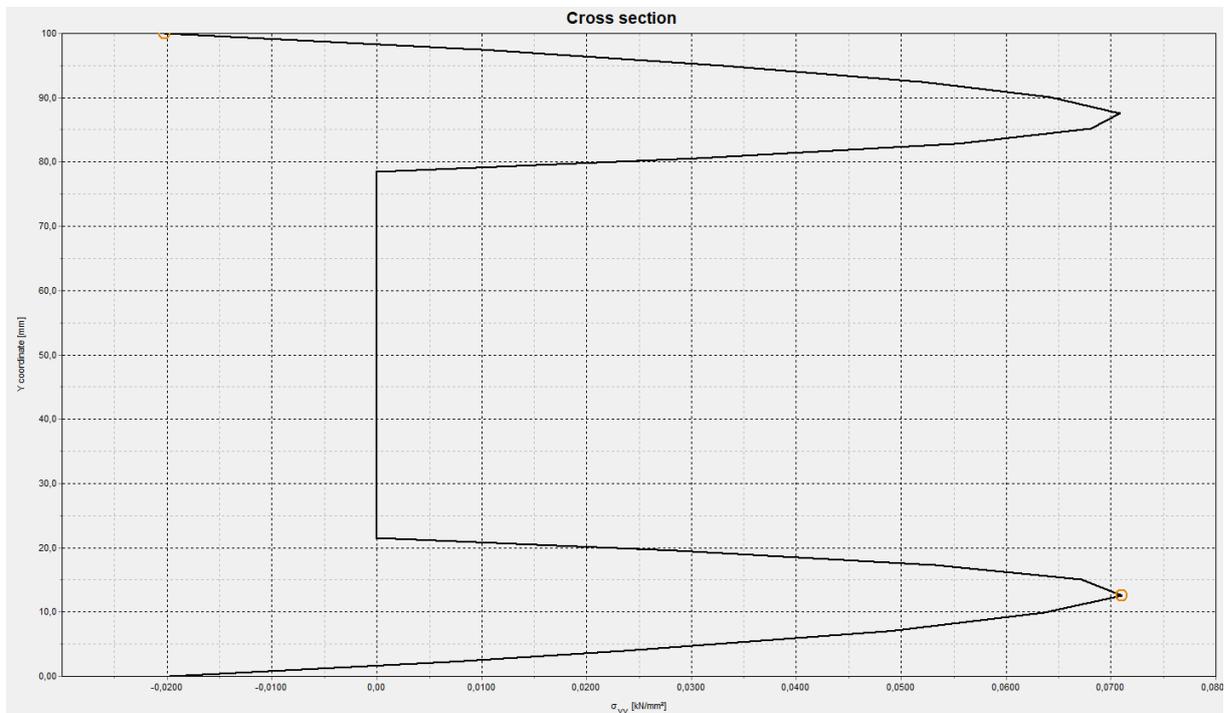


Figura 36. Gráfico de tensiones totales principales verticales (σ_{yy}) en Arenisca Floresta, donde se aprecia el desarrollo de compresiones de valor máximo de $-0,02$ [KN/mm²], para luego hacer presente la cavidad con la generación de tracciones.

Fuente. Elaboración propia.

Para el caso de los tensiones principales totales verticales (σ_{yy}), es que se pueden apreciar que aquellas zonas donde se analizan las tracciones, estos valores son muy cercanos a cero, es decir en esas áreas no influye este tipo de tensiones, pero, por el contrario, perpendicular a estas zonas, por el centro horizontal de la cavidad se aprecia en una tonalidad rojiza intensa, donde las tensiones alcanzan su mayor valor máximo, pero para el análisis de fractura estos

no son relevantes por la alta resistencia que tienen las rocas a la compresión.

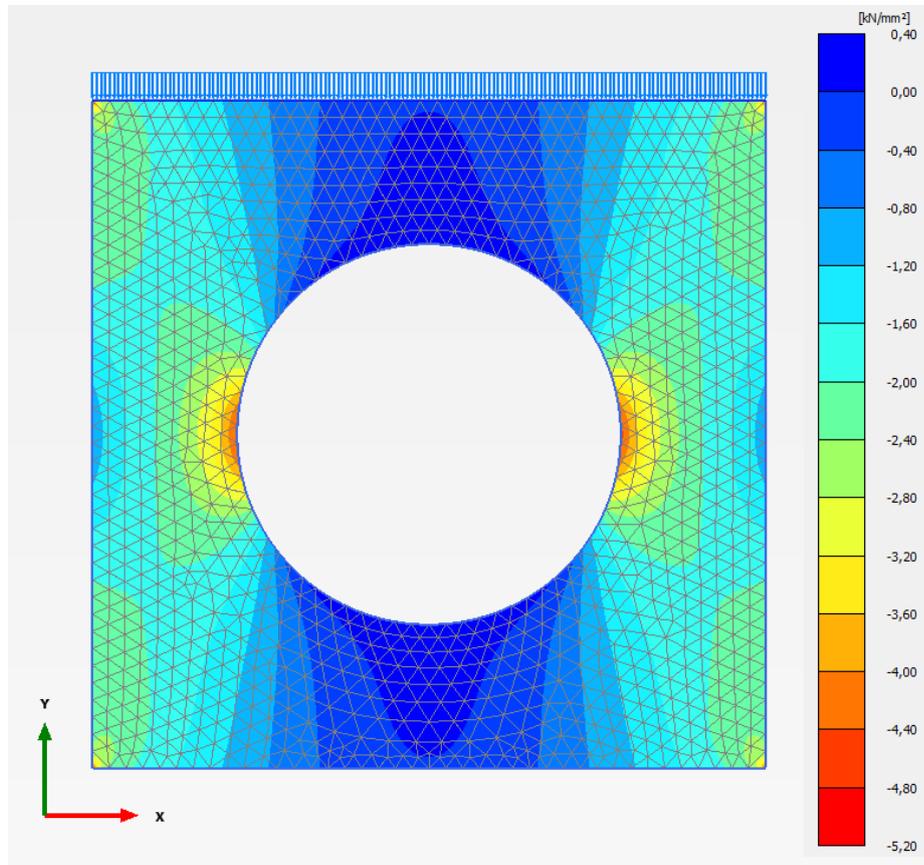


Figura 37. Mapa de colores de tensiones principales verticales (σ_{yy}) Plaxis 2D, Arenisca Floresta.

Fuente. Elaboración propia.

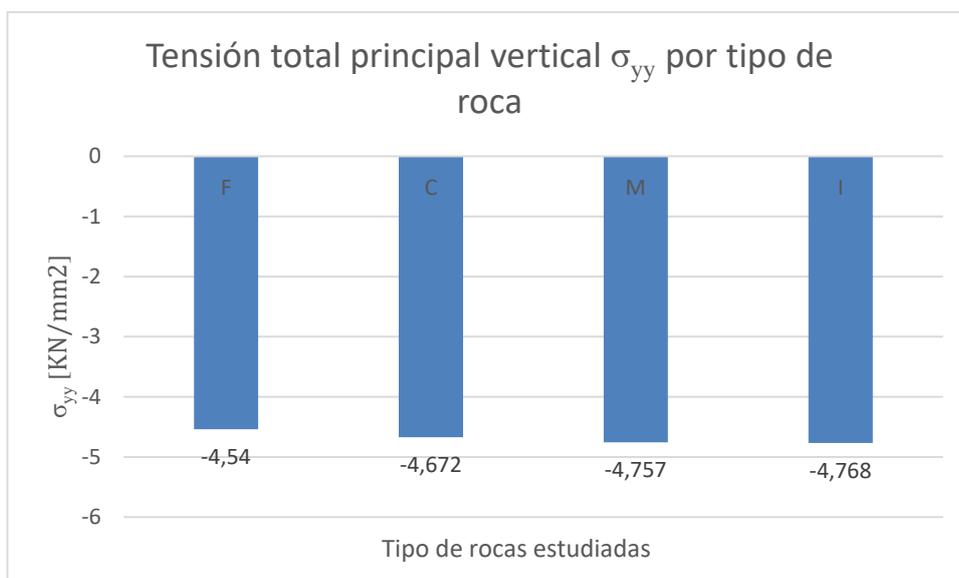




Figura 38. Gráfico de tensiones de compresión Plaxis 2D para cada tipo de roca

Fuente. Elaboración propia.

4. ENSAYO DE CARGA UNIAXIAL

4. ENSAYO DE CARGA UNIAXIAL

En la realización de este ensayo, se aplica carga vertical sobre una probeta de roca con cavidad cilíndrica, con el fin de poder obtener la carga de rotura que se produce por tracciones indirectas en la cavidad.

Aunque el ensayo a realizar no es un ensayo normalizado, para el estudio se toma como referencia la normativa:

- UNE 22-950-90 Métodos de ensayo para la piedra natural. Ensayos para la determinación de la resistencia Parte 2: Resistencia a tracción.

Dado que las condiciones del ensayo a realizar son diferentes a como las describe la normativa, es que estas se utilizarían de manera referencial, tomando en consideración todos aquellos rasgos que sean útiles para el desarrollo de este.

Es así que, para darle orden al desarrollo del ensayo, es que se describirán por etapas el ensayo a realizar, donde se parte con "Preparación de ensayo", donde se describen los trabajos necesarios previos a la aplicación de la carga, luego "Aplicación de Carga Uniaxial", en la cual se describen los pasos necesarios durante la aplicación de la carga hasta llegar a su rotura, y, por último, "Post Rotura", que hablara a partir de la rotura con la finalización del ensayo.

4.1. PREPARACIÓN DEL ENSAYO

Para dar inicio al ensayo es que se deben seguir los siguientes pasos:

1° Realizar marcado de eje vertical por el centro de la sección transversal en todas las probetas, por lo que se utiliza escuadra para su trazado.

2° Comprobar que los cableados de energía de todos los equipos estén conectados, considerando ordenador, prensa y amplificador de señales.

3° Programar el software Geolab con la identificación de la muestra, considerando el número y letra de esta, además de incorporar rasgos de las dimensiones para detallar aún más la probeta, en esta etapa se considera el tipo de célula de carga instalado en la prensa, siendo de hasta 15 [T] o 30 [T] según corresponda por el tipo de roca.

4° Se aplica vaselina en caras paralelas que estén en contacto con la prensa, con el fin de reducir la fricción.

*Se debe tener en cuenta que el exceso de la aplicación de vaselina puede causar deslizamiento al momento de la aplicación de la carga por lo que su uso es moderado.

5° Colocar la probeta en la prensa, junto con una placa de acero rígida para mejorar la



distribución de la carga, centrando la célula de carga con las marcas realizadas en el paso 1º, con el fin de que se aplique por el centro de la probeta y que no se produzca vuelco cuando esta rompa.

4.2. APLICACIÓN DE CARGA UNIAXIAL

Para dar inicio al ensayo, se enciende la prensa y se ajusta la velocidad de carga. Como referencia se toma lo indicado en la normativa UNE 22-950-90 Métodos de ensayo para la piedra natural. Ensayos para la determinación de la resistencia Parte 2: Resistencia a tracción. Que establece un mínimo de la duración del ensayo entre 15 [s] y 60 [s], por lo que se ajusta en la velocidad de 0,25 [mm/s], para una duración promedio de 2,5 minutos. Esto se mantiene para todas las probetas, por lo que se tienen los siguientes:

- 1º Realizar una precarga manual con la manivela de la prensa, para dar un ajuste de posición y lectura de los instrumentos, esto se refleja en el ordenador
- 2º Dar en el ordenador “Empezar ensayo” y colocar en primera a la prensa, para que empiece a realizar la carga automática con la velocidad ingresada.
- 3º En cuanto ocurra la rotura de la probeta, darle a “STOP”, donde detiene la carga y en el ordenador dar “Termina ensayo” para que este detenga la lectura de señales.

4.3. POST ROTURA

Producida la rotura de la probeta y detenida la lectura de datos se procede a realizar los siguientes pasos:

- 1º Realizar la descarga para liberar la probeta de la prensa.
- 2º Retirar la probeta de la prensa con el cuidado de mantener la forma de rotura para la toma de fotografía.
- 3º Se realiza una limpieza exhaustiva de los residuos de la probeta como de la vaselina que se adhiere a la prensa, esto a modo de preparación para el siguiente ensayo.

Producida la rotura de la probeta y detenida la lectura de datos se procede a realizar los siguientes pasos:

- 1º Realizar la descarga para liberar la probeta de la prensa.
- 2º Retirar la probeta de la prensa con el cuidado de mantener la forma de rotura para la toma de fotografía.
- 3º Se realiza una limpieza exhaustiva de los residuos de la probeta como de la vaselina que se adhiere a la prensa, esto a modo de preparación para el siguiente ensayo.

5. **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El desarrollo de este capítulo se basará en presentar los datos obtenidos luego de llevar a cabo la rotura de las 27 probetas de rocas. Estos se analizarán primeramente por medio de una planilla Excel, donde se ingresan los datos de identificación de cada una de ellas en conjunto con la carga de rotura obtenida.

Luego de la identificación de los datos, se toma como referencia el anejo C de la norma UNE-EN-1926: Determinación de la resistencia a compresión simple, para realizar un filtro según aquellas cargas que no cumplan con el mínimo que se calcula con el análisis estadístico que indica la norma. Para realizar una comparación del tratamiento hecho, es que se expondrán los resultados obtenidos del promedio antes y después de este, para ver la influencia que produce.

Seguido por medio de la modelación virtual de las probetas, se pudo obtener un gráfico para cada tipo de roca, que expresa el desarrollo de las tensiones normales generadas en la cavidad, específicamente en las zonas de más altas tensión (eje vertical de la cavidad), donde se aprecian la simetría tanto zona superior como inferior de esta. Es así que se tomara la zona superior del eje vertical de la cavidad para el análisis de predicción por el Método del Punto, que en conjunto con el valor obtenido del promedio luego del tratamiento estadístico, nos dará un valor que se interpretara de manera que dé una respuesta a si las resistencias esperadas se apegan a los valores de bibliografía que se recopilaron.

Para cerrar el estudio realizado, se realizará un análisis descriptivo de manera cualitativa de la forma de rotura de las probetas ensayadas, donde se identificarán formas las cuales se irán describiendo para ir identificando similitudes y constantes de las fracturas.

5.1. ANÁLISIS INICIAL DE DATOS

Para dar inicio a los datos obtenidos del ensayo, es que por medio de la planilla Excel y los datos entregados por el software Geolab, siendo estos datos de deformación captadas por el sensor de deformación vertical LVDT y datos de cargas en Newton [N], leídas por la célula de carga, donde se entregan por medio un block de notas, con la respectiva información de cada probeta, se realiza una identificación de los valores máximos de cargas.

Probeta	[N]
F8.1	65224
F8.2	55836
F8.3	24477
F22.1	45502

Probeta	[N]
F22.2	39345
F22.3	38892
F23.1	70835
F23.3	28895
F23.3	59379

Tabla 7. Valores de cargas máximas obtenidas por el ensayo de carga uniaxial. “Arenisca Floresta”.

Fuente. Elaboración Propia.

5.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para este análisis se toman en consideración los pasos asociados al tratamiento estadístico mencionado en el anejo C de la normativa UNE-EN-1926-2007, la cual establece los conceptos básicos para el método.

Este método se basa, que para el cálculo del valor de tensión inferior esperado (E), se asuma una distribución normal logarítmica, donde este valor corresponde al cuantil 5 [%] de una distribución normal logarítmica para un nivel de confianza del 75 [%].

Es así que para entendimiento del tratamiento se nombran a continuación en el orden que se deben seguir los pasos necesarios para calcular el valor inferior de los datos resultantes:

- 1° Ingreso de valores medidos (Tensiones)
- 2° Cuantificar el número de valores.
- 3° Determinar media aritmética
- 4° Calculo de la desviación estándar
- 5° Calculo del Coeficiente de variación
- 6° Determinar media logarítmica
- 7° Calculo de Desviación estándar logarítmica
- 8° Valor máximo de datos medidos
- 9° Elección del cuantil
- 10° Calculo de Valor inferior esperado
- 11° Eliminación de los valores medidos que no lleguen al valor mínimo calculado en paso 10°.



Con esta metodología, se logra obtener un nuevo promedio aritmético representativo para luego pasar por el método del punto y ver la precisión del cálculo.

Se toman la consideración de que existe una distribución normal para el cálculo del valor medio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, y en cuanto para el valor inferior esperado se asume una distribución normal logarítmica, el cual pertenece al cuantil de 5[%] con el nivel de confianza del 75 [%].

Para la elección del cuantil “ k_s ” este se obtiene considerando el número de probetas que se tiene para cada tipo de roca, y con la tabla C.1 del anejo de la normativa señalada (Figura 39).

n	k_s
3	3,15
4	2,68
5	2,46
6	2,34
7	2,25
8	2,19
9	2,14
10	2,10
15	1,99
20	1,93
30	1,87
40	1,83
50	1,81
∞	1,64

Figura 39. Tabla de Cuantil 5 [%].

Fuente. Anejo C, UNE-EN-1926-2006.

Como en el estudio se estandarizo para que el número de probetas por cada tipo de roca sea 9, es que se tiene un valor de cuantil $k_s=2,14$, valor que utilizara para el cálculo de los 4 valores mínimos esperados, que se aplica en la siguiente ecuación, que utiliza el cuantil, la media logarítmica con su desviación estándar:

$$\text{Limite inferior esperado} = E = e^{(\bar{x}_{ln} - (k_s * S_{ln}))}$$

A continuación, se presentan las tablas 8 y 9, donde se muestra la entrada de los valores en orden para la determinación del valor inferior, a modo de resumen esta muestra el procedimiento de los 4 valores mínimos calculados y en la segunda se muestra la manera en



que influye para la eliminación de los valores que estén por debajo del límite.

TRATAMIENTO ESTADISTICO	Arenisca Floresta	Caliza Moleanos	Mármol Macael	Mármol Carrara
Número de probetas	9	9	9	9
Media [N]	34016	47598	83914	93671
Desviación Estándar	6339	16163	14110	6832
Coefficiente de Variación %	19%	34%	17%	7%
Media Logarítmica [N]	10,42	10,71	11,32	11,45
Desviación Estándar Logarítmica	0,19	0,37	0,18	0,07
Tensión máxima [N]	44382	70835	101298	107406
Tensión mínima [N]	25004	24478	62442	84358
Valor inferior esperado [N]	22146	20541	56695	80209

Tabla 8. Límites mínimos esperados cálculos según anejo C de norma UNE-EN-1926-2007, para cada tipo de roca analizada.

Fuente. Elaboración propia.

n	X	lnX	X-Media	(X-Media)^2	lnX-Media ln	(lnX-Media ln)^2	Xfiltro
1	36267,27	10,50	2251,39	5068741,27	0,08	0,01	36267,2687
2	36904,39	10,52	2888,50	8343456,64	0,10	0,01	36904,3864
3	26256,63	10,18	-7759,25	60205995,91	-0,24	0,06	26256,6299
4	36045,94	10,49	2030,06	4121144,91	0,07	0,01	36045,9425
5	25004,46	10,13	-9011,42	81205700,83	-0,29	0,09	25004,4616
6	37637,14	10,54	3621,26	13113522,70	0,12	0,01	37637,142
7	44382,21	10,70	10366,32	107460661,29	0,28	0,08	44382,2056
8	27801,02	10,23	-6214,86	38624483,30	-0,19	0,03	27801,0223
9	35843,88	10,49	1828,00	3341578,23	0,07	0,00	35843,8806

Tabla 9. Aplicación del valor inferior calculado “Arenisca Floresta”.

Fuente. Elaboración propia.

Para la toma de muestras se realiza un análisis de la dispersión de datos, donde revisa el coeficiente de variación determinado, el cual entregará la homogeneidad de los datos entregados, este se evaluará según la tabla 10.

Coefficiente de Variación (CV) %	Variabilidad
CV=0%	Nula
0<CV≤20%	Baja



Coeficiente de Variación (CV) % $20% < CV \leq 60%$	Variabilidad Moderada
$60% < CV \leq 90%$	Alta
$90% < CV$	Muy Alta

Tabla 10. Medidas de dispersión y de forma, Universidad nacional Mayor de San Marcos (León, 2016).

Luego de identificar los valores inferiores de cargas, se tiene la resolución de que, en los 4 tipos de rocas, los valores aprobaron el tratamiento estadístico, por lo que ningún valor fue filtrado, ya que todos estaban por sobre el límite mínimo correspondiente, por lo que se procede a utilizar la media aritmética de cada tipo de roca para la verificación por método del punto y su modelo virtual correspondiente.

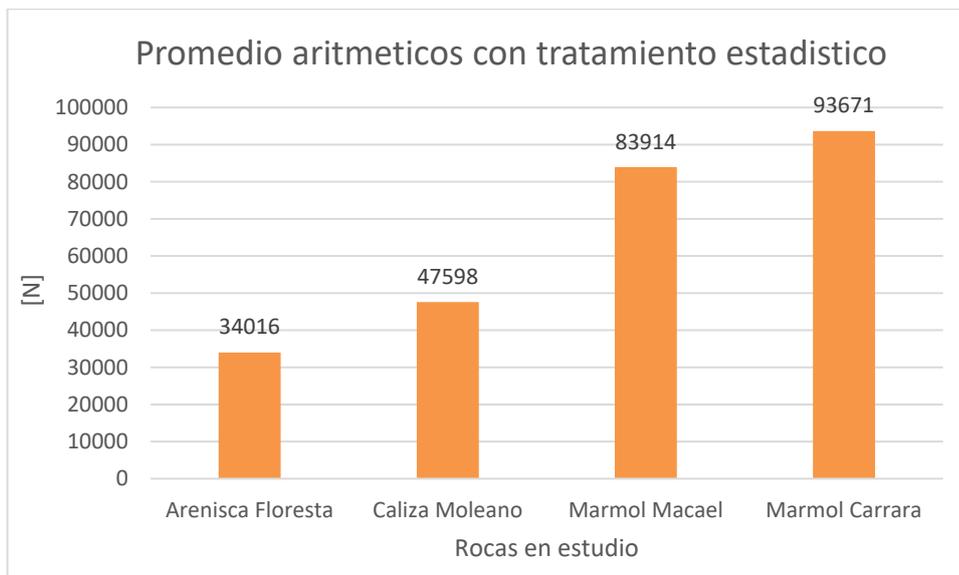


Figura 40. Grafica de promedios aritméticos de cargas para cada tipo de roca, luego de pasar por tratamiento estadístico.

Fuente. Elaboración propia.

5.3. ANÁLISIS POR MÉTODO DEL PUNTO

Para dar inicio a este análisis es que necesitaremos valores obtenidos de los capítulos anteriores, específicamente de la bibliografía recopilada, siendo los valores de resistencia a tracción de cada material con sus respectivas distancias críticas (L), además de los valores obtenidos por medio de los ensayos realizados en laboratorio.

	Arenisca Floresta	Caliza Moleanos	Mármol Macael	Mármol Carrara
Distancia crítica L [mm]	3,66	2,3	2,85	8,81
L/2 [mm]	1,83	1,15	1,425	4,405
Resistencia a tracción [MPa]	3,38	7,08	8,15	8,69

Tabla 11. de largo crítico y resistencias a tracción por ensayo brasileño.

Fuente. Elaboración propia.

Es así que se inicia con la modelación virtual en Plaxis 2D, donde se utilizan los valores de tensiones totales normales, que se producen por la zona de altas tracciones, es decir, por el eje vertical de la cavidad, la cual se produce en el corte A-A' como muestra la figura.

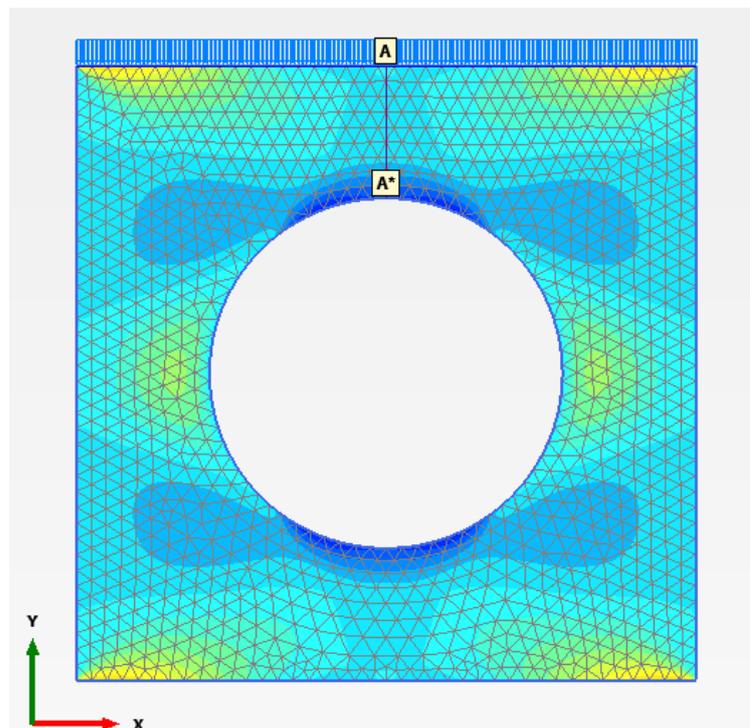


Figura 41. Corte de la probeta por zona de altas tracciones A-A' "Arenisca Floresta".

Fuente. Elaboración propia.

Dado como se muestra en el estudio de espesor de probeta, es que las tensiones son simétricas tanto para la zona superior como inferior de la probeta, es que solo se utilizan los datos de la zona superior para no ser redundante en el cálculo.

El trabajo del método del punto inicia con utilización del largo crítico, utilizando $L/2$, el cual se debe ubicar en el gráfico de tensiones, lo que es necesario interpolar para determinar la tensión que corresponda para esa distancia.

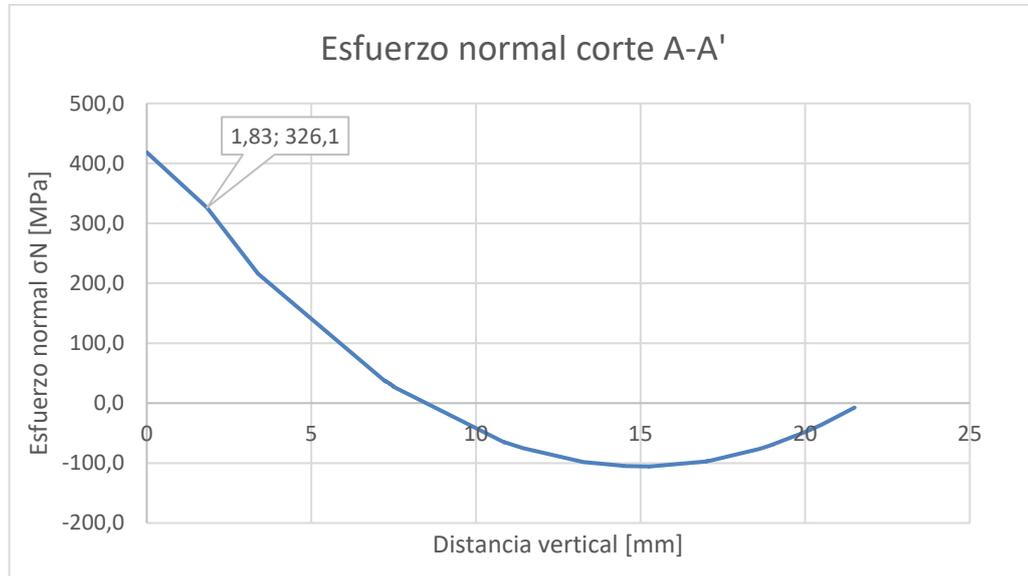


Figura 42. Grafico de tensiones totales normales y distancia de estudio.

Fuente. Elaboración propia.

Dada que las tensiones producidas son producto de una carga unitaria, es que es necesario calcular el factor de amplificación, por lo se toma en consideración el valor de la tensión a rotura por tracción de la figura X y el valor de la tensión de rotura en la mitad de la distancia crítica, por lo que se obtiene según la siguiente ecuación.

$$\text{Factor} = \frac{\text{Resistencia a tracción [MPa]}}{\text{Tension normal en L/2 [MPa]}}$$

Con el factor de amplificación resuelto, se procede a llevar el esfuerzo unitario modelado al esfuerzo de tracción considerado por la bibliografía recopilada, para determinar la predicción de la tensión de rotura, por medio de la multiplicación de estos. Para luego por medio de la formulación del esfuerzo, siendo carga sobre área, en donde se ingresa el área de aplicación de la carga, se determina la carga predicha de rotura en Newton [N], la cual servirá como referencia para determinar la precisión de las cargas determinadas por los ensayos realizados en el laboratorio.

Método del Punto- Arenisca Floresta	
Área	4000 mm ²
Esfuerzo en L/2	306,758 MPa
Esfuerzo rotura tracción	3,38 MPa
Factor de amplificación	0,011
Predicción de esfuerzo	0,011 KN/mm ²

Método del Punto- Arenisca Floresta	
Predicción de esfuerzo	11,018 Mpa

Tabla 12. Calculo de la predicción por método del punto del esfuerzo de rotura para probetas de rocas con cavidades.

Fuente. Elaboración propia.

Para finalizar el estudio es que se comprueba que los resultados obtenidos de los ensayos laboratorios son fiables en relación a la carga de rotura calculada luego del método del punto realizado, expresando la cercanía por medio de porcentajes.

	Arenisca Floresta	Caliza Moleano	Mármol Macael	Mármol Carrara
Tensión de predicción MP [MPa]	11,02	12,17	10,66	18,09
Tensión de laboratorio [MPa]	8,50	11,90	20,98	23,42
Cociente	1,30	1,02	0,51	0,77

Tabla 13. Cociente de la tensión de rotura en relación a la carga modelada por Plaxis 2D

Fuente. Elaboración propia.

5.4. INFLUENCIA DEL COMPORTAMIENTO ELÁSTICO-LINEAL

Dado que se tiene una hipótesis de las rocas analizadas con un comportamiento de tensiones y deformaciones con carácter elástico-lineal con el cual se realizaron las modelaciones numéricas, es que se analiza cómo es que este influye en el comportamiento real de las rocas, logrado por la tenencia de resultados de ensayos de compresión simple para los mismos materiales estudiados, donde se visualiza gráficamente el desarrollo de estos, para así identificar cual sería el comportamiento que corresponde a cada uno de ellos.

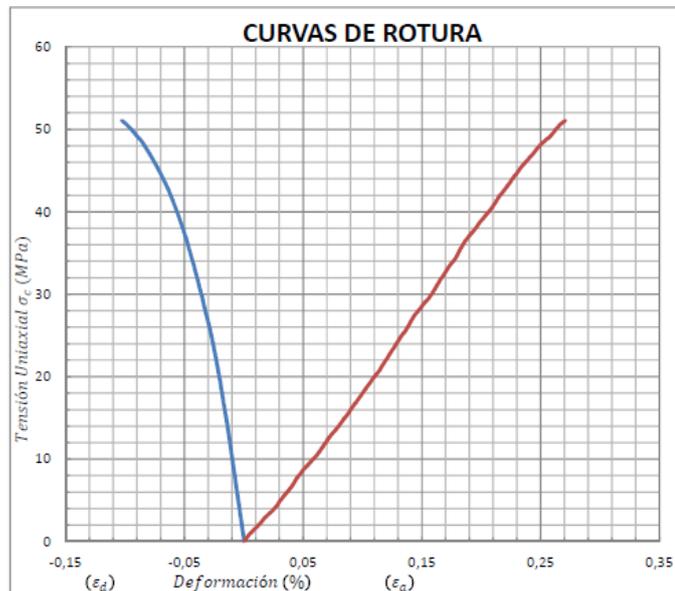


Figura 43. Grafica de relación carga-deformación de “Arenisca Floresta” a 23° grados (Gonzales, 2020)

Para el caso de la “Arenisca Floresta”, se da que el comportamiento lineal-Elástico se asemeja al esperado, ya que como se muestra en el ensayo a compresión, el desarrollo de las deformaciones es relativamente lineal en función al aumento de la carga, donde no se aprecia zonas de plasticidad relevante.

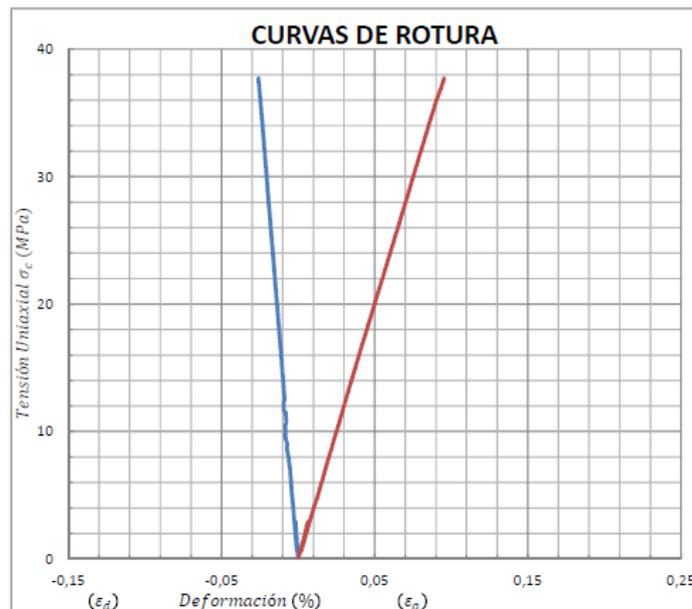


Figura 44. Grafica de relación carga-deformación de “Caliza Moleano” a 23 grados (Rauter, 2020)

En cuanto al material calizo, se puede confirmar el comportamiento perfectamente lineal de las tensiones y deformaciones, donde la rotura no se produce luego de una curva de plasticidad, si no que se aprecia que la rotura se produce en la cúspide de la zona elástica.

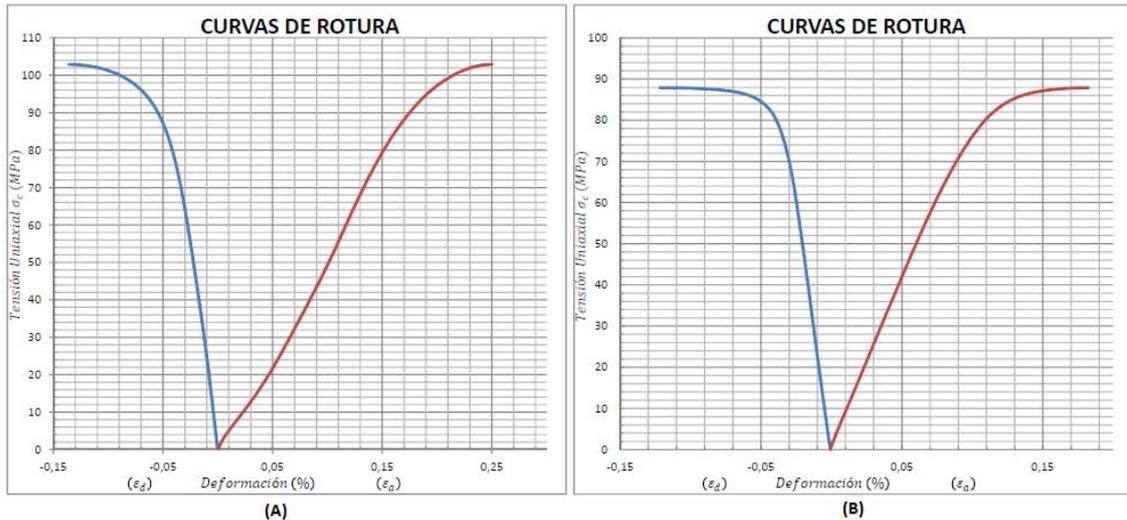


Figura 45. Grafica de relación carga-deformación de “Mármol Macael” (A) y “Mármol Carrara” (B) a 23 grados (Gonzales, 2020).

Para el caso de los mármoles se puede apreciar la curvatura del desarrollo de tensiones, es decir el material pasa por su fase lineal elástica, para pasar a la zona de plasticidad donde el incremento de tensiones se ve disminuida en relación al crecimiento de las deformaciones, esto antes de llegar a la rotura, por lo que no es puramente lineal el comportamiento.

5.5. DESCRIPCIÓN CUALITATIVA DE LA FRACTURA

En cuanto a la descripción cualitativa, se realiza de manera general, ya que la rotura se produce por las zonas estudiadas, fracturas por el eje vertical de la cavidad, la cual mantiene una línea recta a lo largo de la probeta. Esta fractura por medio de grabación audiovisual fue posible discernir que fue la primera que se realiza, para luego pasar a la fractura que se aprecia en diagonal hacia una o dos de las esquinas inferiores de la probeta, la cual inicial perfectamente se da entre el encuentro de las aristas y la zona del eje horizontal de la cavidad.

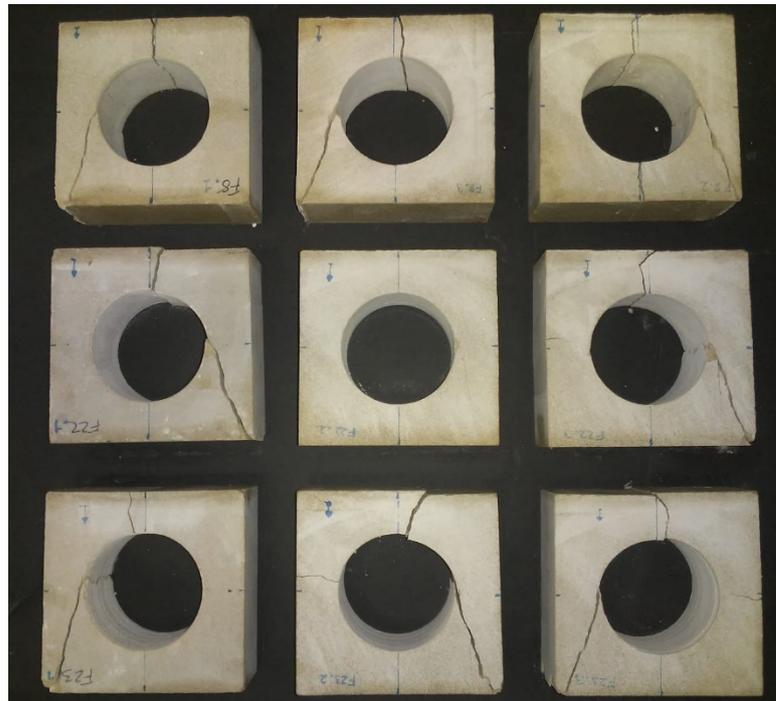


Figura 46. Fractura en probetas de roca “Arenisca Floresta”

Fuente. Elaboración propia.

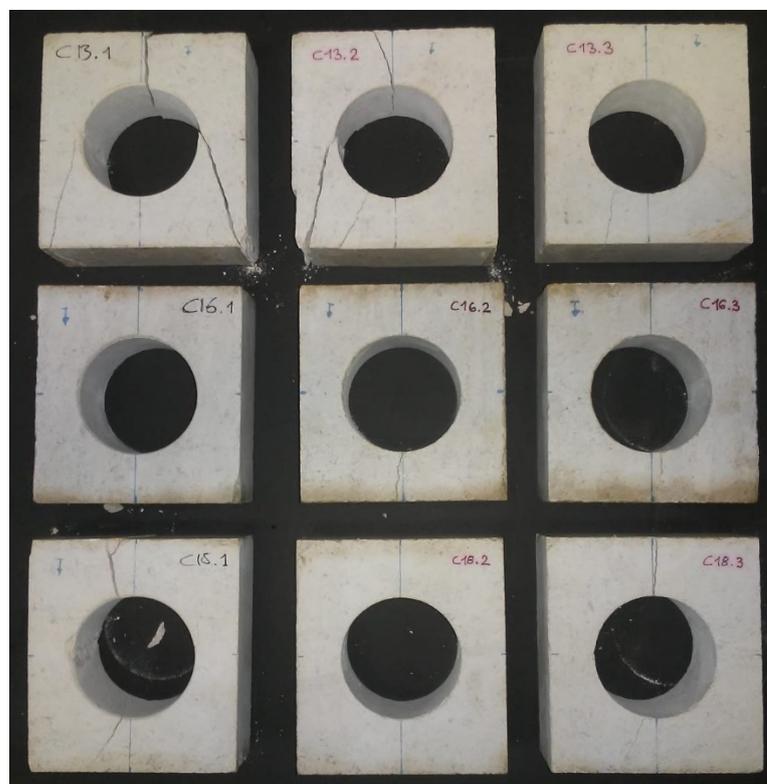


Figura 47. Fractura en probetas de roca “Caliza Moleano”

Fuente. Elaboración propia.

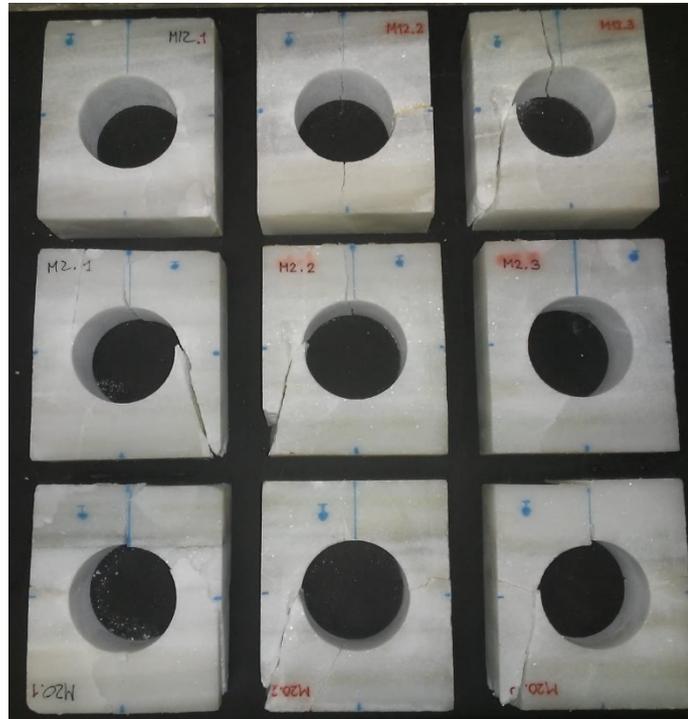


Figura 48. Fractura en probetas de roca “Mármol Macael”

Fuente. Elaboración propia.

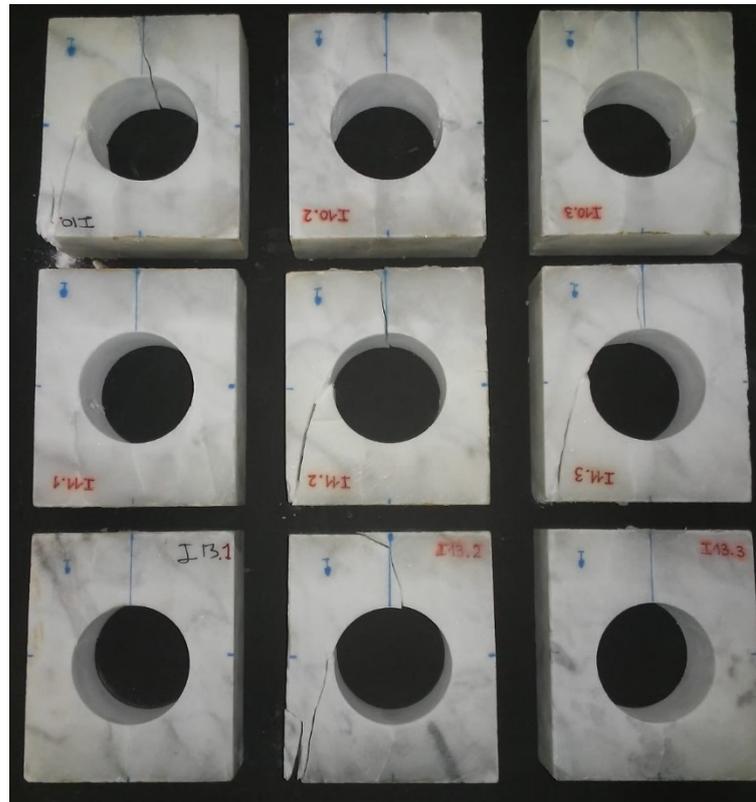


Figura 49. Fractura en probetas de roca "Mármol Carrara"

Fuente. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Finalizado el trabajo realizado se puede determinar el cumplimiento del objetivo general expuesto, donde se logró estudiar el comportamiento mecánico de rocas con una cavidad bajo cargas uniaxiales. El cual por medio del análisis realizado a los modelados en Plaxis 2D y 3D, el tratamiento estadístico a los resultados obtenidos por laboratorio y las predicciones de la carga por método del punto, materia de mecánica de la fractura, fue posible determinar parámetros necesarios para el cálculo de cargas de rotura.

Se pudo observar que los comportamientos de los resultados fueron aceptables en cuanto a la dispersión de estos, en relación a total de las muestras realizadas, donde se aprecia que el coeficiente de variación de la "Arenisca Floresta", fue de un 19% lo que quiere decir que los valores tienen una variabilidad baja, al igual que para las rocas "Mármol Macael" y "Mármol Carrara", que presentaron un 17% y 7% respectivamente. Por otro lado, el que presenta una variabilidad moderada pero aceptada para este cálculo fue la "Caliza Moleanos", lo que da indicios que por factores de manipulación en laboratorio cause el aumento de dispersión.

Es así que, por medio de la baja dispersión de datos, también se logró que los datos obtuvimos aprobaron el tratamiento estadístico, donde ningún valor estuvo bajo los límites inferiores calculados, por lo que se pudieron utilizar de lleno todos los datos obtenidos. El análisis estadístico a pesar de que no filtró ningún valor, fue necesario para dar un entendimiento de que los valores fueron puesto a revisión para su utilización. Esto se debe al análisis previo para la elección de las probetas en el laboratorio antes de sus cortes, donde se hizo hincapié en el criterio de simetría geométrica de estas y la prolijidad de las terminaciones de los cortes, ya que, teniendo un universo de 85 probetas prismáticas para su corte, solo se escogieron 9 para realización de estos.

Por medio del modelado, se dio la constante que en todas las probetas modeladas las tensiones máximas de tracciones se reducían a la zona superior por el centro de la cavidad, es así que, por análisis del método del punto y la porción estudiada en el corte realizado de la probeta, se logró obtener la carga de rotura en relación a resistencia a la tracción que se obtuvo por trabajo bibliográfico, arrojando la relación en cociente entre las cargas de rotura obtenidas por laboratorio y el valor de la carga modelada. Para el caso de la "Arenisca Floresta" la relación de la carga fue de un 1,3, siendo la más alta de las 4, la más exacta fue la "Caliza Moleanos" con un 1,02, y para "Mármol Macael" y "Mármol Carrara", un 0,5 y 0,7 respectivamente.

Concluyendo por los mármoles, la baja relación del cociente entre las cargas determinadas, se debe a que el método del punto realizado para este tipo roca, no fue el más conveniente para la comprobación de resultados, dada la naturaleza mecánica de estas, ya que el someterse a una carga, la rotura no se produce por una zona elástica-lineal, sino más bien luego de desarrollarse una zona plástica, donde se aprecia el aumento de las deformaciones, sin ser correspondido por las tensiones resistidas, las cuales no aumentan causando la

curvatura de la gráfica.

Para el caso de la "Arenisca Floresta" donde se obtiene una relación de 1,3 entre los cocientes de cargas determinadas, se puede apreciar que, debido al comportamiento elástico-lineal revisado en los análisis, el cual no es del todo perfecto, se reflejó en la relación, dado que a diferencia los mármoles que no alcanzaron a igualar el valor esperado, este lo supera, cumpliendo con el valor esperado, es decir el método del punto si fue efectivo para esta roca, ya que supero la carga modelada.

Finalmente, para la "Caliza Moleanos", siendo la más exacta de las 4 rocas analizadas en relación a la carga modelada, teniendo un cociente de 1,02, se puede decir que el método del punto fue el método más efectivo al momento predecir el valor de rotura, ya que como se explica que el método utiliza como base que la roca tiene un comportamiento elástico-lineal, el material calizo según el análisis realizado tiene uno perfectamente elástico-lineal. Así mismo se puede comprobar que la modelación realizada en Plaxis 2D, fue realizada con éxito, donde se pudo apreciar que las condiciones de bordes determinadas, como la libre deformación horizontal pudieron ser recreadas en el ensayo.

Es así que la hipótesis de tratar a los 4 materiales con el comportamiento elástico-lineal no fue el más correspondido para los mármoles, teniendo el desarrollo de zonas plásticas, donde esto afecta tanto el modelado numérico como el método utilizado, produciendo que las relaciones se alejen de los valores esperados con los determinados en laboratorio. Por lo que se propone que, para estudios futuros, específicamente los mármoles estos se realicen mediante métodos que se basen en estos comportamientos, como lo describe la mecánica de la fractura, donde se considere las zonas plásticas. Y por último a modo de comprobación incluir la "Arenisca Floresta" dado que no es perfectamente lineal como lo es la caliza, y así visualizar si es que se acerca aún más a los valores modelados.

Por último, se propone la realización del mismo estudio, pero considerando carga de manera triaxial, donde se podría analizar en su totalidad el comportamiento de la cavidad, tanto compresiones que están fuera del alcance de este análisis como tracciones al estar bajo presiones de confinamiento.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Se ordenan las publicaciones, artículos, normativos y documentos que fueron consultados para la realización del trabajo de fin de grado:

- Anon., s.f. Arenisca floresta, abril 2019, <http://www.pinayca.com/html/areniscas/Floresta-info.htm>.
- Anon., s.f. MÁRMOL CARRARA abril 2019, https://neufertcdn.archdaily.net/uploads/product_file/file/22666/MARMOL_CARRARA_1_.pdf
- Anon., s.f. PIEDRA NATURAL FLORESTA O PIEDRA NATURAL VINAIXA. Abril 2019, <https://ww.eduardmoragues.es/materiales/piedras-areniscas/piedrafloresta-piedra-vinaixa/>
- Ávila, G. (2004), Estudio de la retracción y el agritamiento de arcillas. Aplica a la arcilla de Bogotá, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Escanciano, J (2018), Análisis microestructural de la fractura de las rocas mediante microscopía óptica, Trabajo Final de Grado ETS de Caminos UNICAN.
- Feng-qiang Gong, Young Luo, Xi-bing Li, Xue-feng Si, Ming Tao (2018), Experimental simulation investigation on rockburst induced by spalling failure in deep circular tunnels
- Grupo Geotecnia, ETS de Ingenieros en Caminos, Canales y Puertos UNICAN, "Rocks Mechanics", Catedra de Obras Geotécnicas.
- Gonzales, R. (2020), Estudio del comportamiento mecánico de probeta de roca a compresión simple a distintas temperaturas}.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., Zimmerman R. W., (2007), Fundamentals of rocks mechanics, Fourth Edition.
- Jarufe J, Orrego C, (2017), Mecánica de Rocas I, Soluciones elásticas de Kirsch.
- Justo, J., Castro, J., Cicero, S., Sánchez-Carro, M.A., & Husillos, R., (2017). Notch effect on the fracture of several rocks: Application of the Theory of Critical Distances.
- Justo, J., Castro, J., Cicero, S, (2018), Energy-based approach for fracture assessment of several rocks containing U-shaped notches through the application of the SED criterion.
- León, V. (2015) Medidas de dispersión y de forma, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Realpe F., Ochoa Y, Franco F, Díaz P, (2017), Solución del problema de Kirsch mediante elementos libres de malla, utilizando funciones de interpolación de base radial.
- S. Y. Wang, S. W. Sloan, D. C. Sheng, C. A. Tang (2011) Numerical analysis of the failure process around a circular opening in rock.
- Taylor, D., (2007). "The theory of critical distances: a new perspective in fracture

mechanics”, Elsevier.

- UNE 22-950-90 Métodos de ensayo para la piedra natural. Ensayos para la determinación de la resistencia Parte 2: Resistencia a tracción.
- UNE-EN-1926-2007 Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.
- Xing-dong ZHAO, Hong-xun ZHANG, Wan-cheng ZHU (2013) Fracture evolution around pre-existing cylindrical cavities in brittle rocks under uniaxial compression.
- Zoback, M, (2007), Reservoir Geomechanics

ANEXOS

ANEXOS 1: ENTRADA DE RESULTADOS Y TRATAMIENTO ESTADISTICO

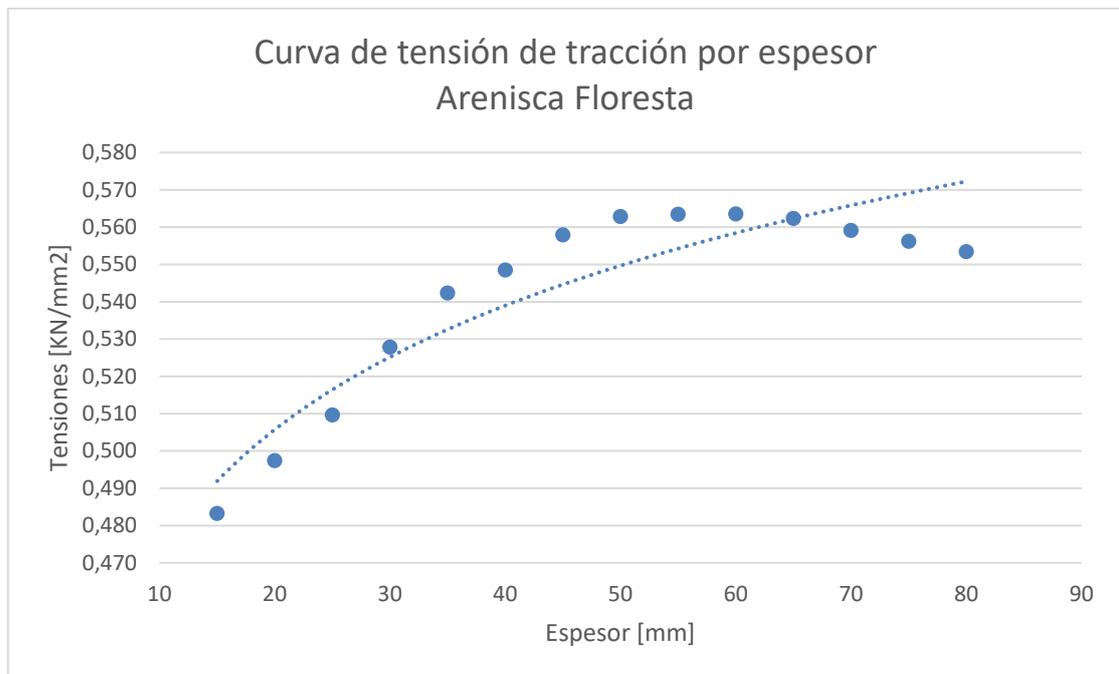
Arenisca Floresta			Caliza Moleanos		
Área:	4000	[mm ²]	Área :	4000	[mm ²]
Probetas	[N]	[Mpa]	Probetas	[N]	[Mpa]
F8.1	36267	9,1	C13.1	65224	16,3
F8.2	36904	9,2	C13.2	55836	14,0
F8.3	26257	6,6	C13.3	24478	6,1
F22.1	36046	9,0	C16.1	45502	11,4
F22.2	25004	6,3	C16.2	39345	9,8
F22.3	37637	9,4	C16.3	38892	9,7
F23.1	44382	11,1	C18.1	70835	17,7
F23.2	27801	7,0	C18.2	28895	7,2
F23.3	35844	9,0	C18.3	59379	14,8

Mármol Macael			Mármol Carrara		
Área:	4000	[mm ²]	Área:	4000	[mm ²]
Probetas	[N]	[Mpa]	Probetas	[N]	[Mpa]
M2.1	93990	23,5	I10.1	93524	23,4
M2.2	91941	23,0	I10.2	107406	26,9
M2.3	79189	19,8	I10.3	99927	25,0
M12.1	62442	15,6	I11.1	89386	22,3
M12.2	74407	18,6	I11.2	84358	21,1
M12.3	101298	25,3	I11.3	96194	24,0
M20.1	64838	16,2	I13.1	92063	23,0
M20.2	94205	23,6	I13.2	91804	23,0
M20.3	92915	23,2	I13.3	88374	22,1

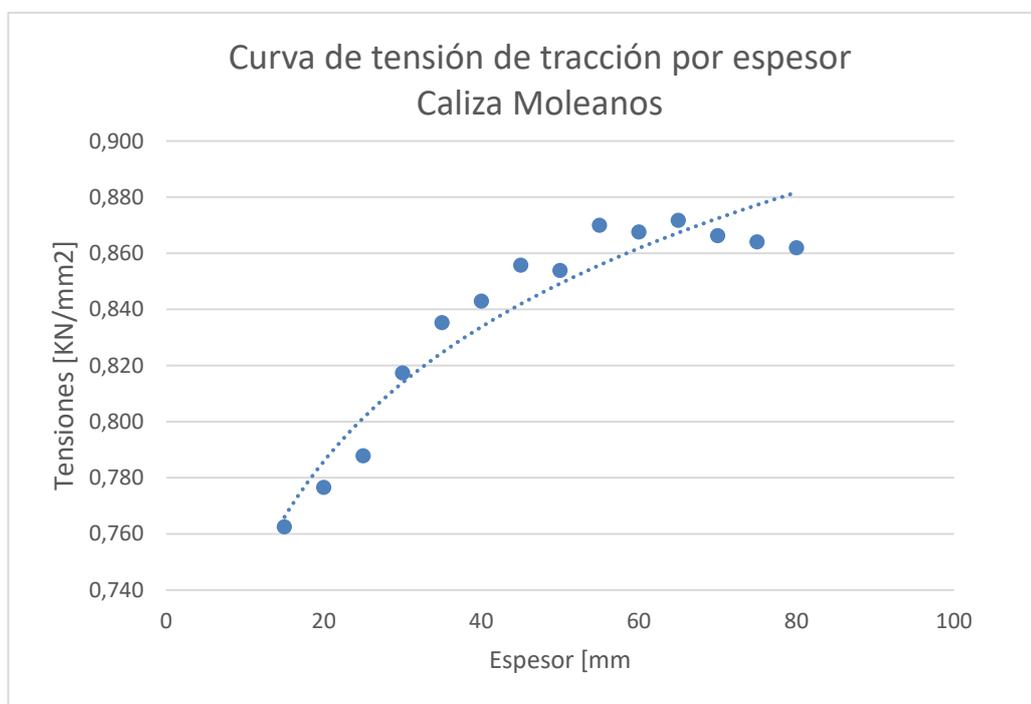
TRATAMIENTO ESTADISTICO	Arenisca Floresta	Caliza Moleanos	Mármol Macael	Mármol Carrara
Número de probetas	9	9	9	9
Media [N]	34016	47598	83914	93671
Desviación Estándar	6339	16163	14110	6832
Coefficiente de Variación %	19%	34%	17%	7%
Media Logarítmica [N]	10,42	10,71	11,32	11,45
Desviación Estándar Logarítmica	0,19	0,37	0,18	0,07
Tensión máxima [N]	44382	70835	101298	107406
Tensión mínima [N]	25004	24478	62442	84358
Valor inferior esperado [N]	22146	20541	56695	80209

ANEXOS 2: ESTUDIO DE ESPESOR DE PROBETAS

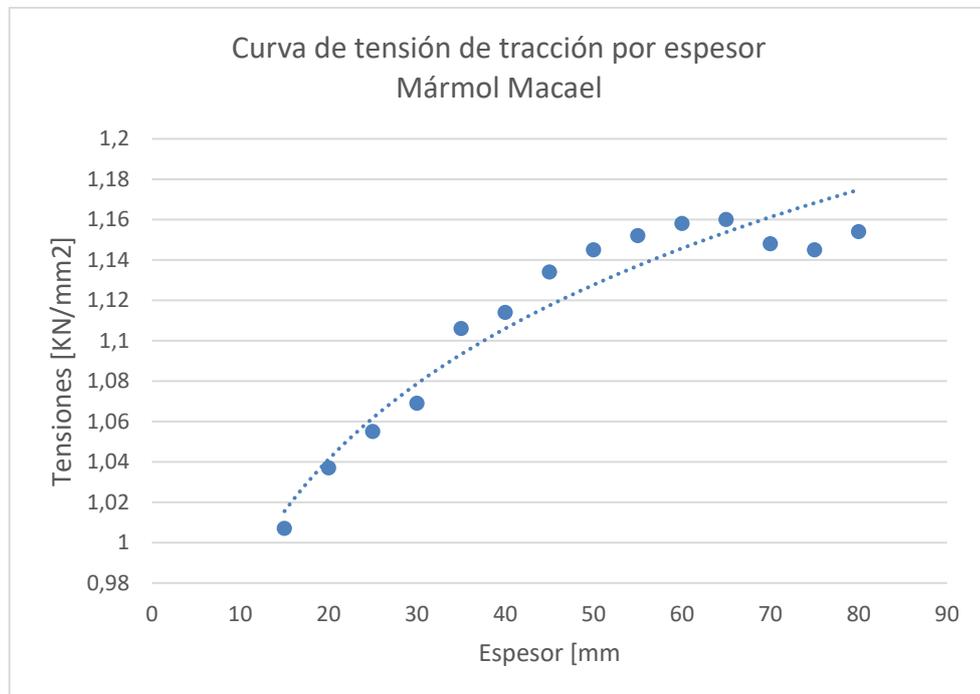
Estudio de espesor Plaxis 3D Arenisca Floresta		
Sección	Espesor [mm]	Tensión Tracción [KN/mm ²]
100x100	15	0,483
100x100	20	0,497
100x100	25	0,510
100x100	30	0,528
100x100	35	0,542
100x100	40	0,549
100x100	45	0,558
100x100	50	0,563
100x100	55	0,563
100x100	60	0,564
100x100	65	0,562
100x100	70	0,559
100x100	75	0,556
100x100	80	0,553



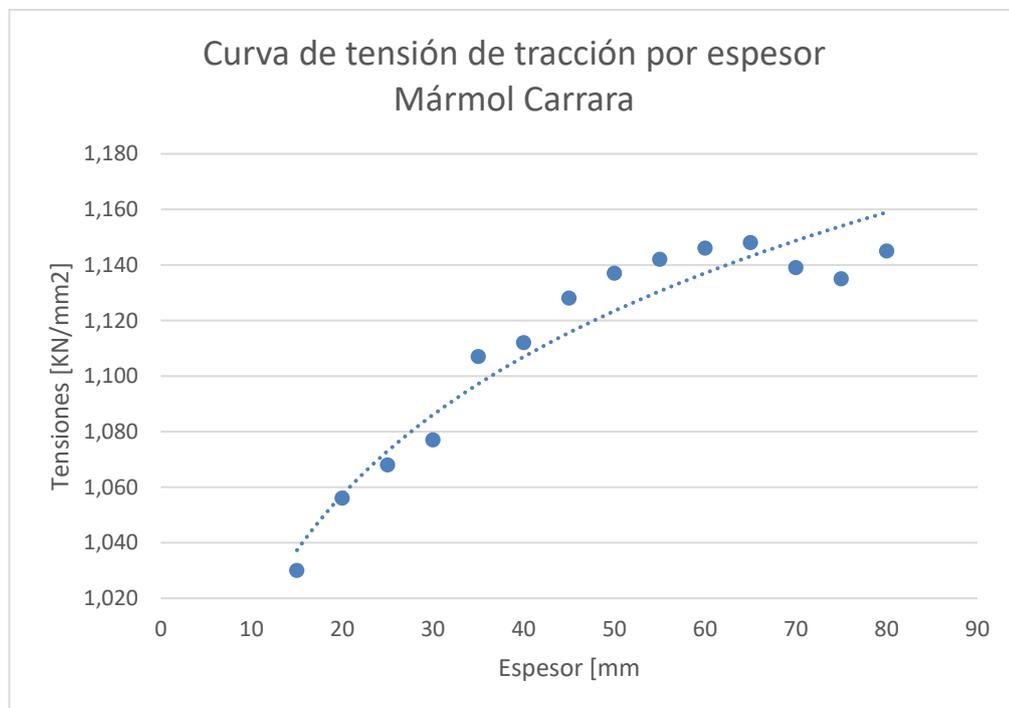
Estudio de espesor Plaxis 3D Caliza Moleanos		
Sección	Espesor [mm]	Tensión Tracción [KN/mm ²]
110x100	15	0,763
110x100	20	0,777
110x100	25	0,788
110x100	30	0,817
110x100	35	0,835
110x100	40	0,843
110x100	45	0,856
110x100	50	0,854
110x100	55	0,870
110x100	60	0,868
110x100	65	0,872
110x100	70	0,866
110x100	75	0,864
110x100	80	0,862



Estudio de espesor Plaxis 3D Mármol Macael		
Sección	Espesor [mm]	Tensión Tracción [KN/mm2]
100x120	15	1,007
100x120	20	1,037
100x120	25	1,055
100x120	30	1,069
100x120	35	1,106
100x120	40	1,114
100x120	45	1,134
100x120	50	1,145
100x120	55	1,152
100x120	60	1,158
100x120	65	1,16
100x120	70	1,148
100x120	75	1,145
100x120	80	1,154



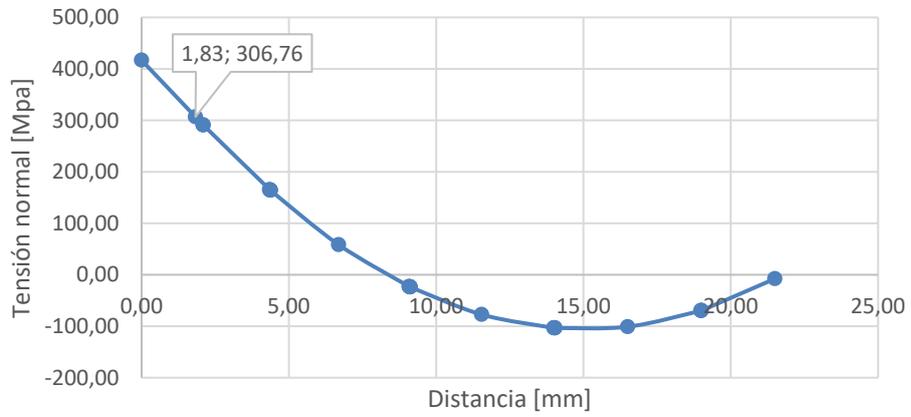
Estudio de espesor Plaxis 3D Mármol Carrara		
Sección	Espesor [mm]	Tensión Tracción [KN/mm ²]
100x120	15	1,030
100x120	20	1,056
100x120	25	1,068
100x120	30	1,077
100x120	35	1,107
100x120	40	1,112
100x120	45	1,128
100x120	50	1,137
100x120	55	1,142
100x120	60	1,146
100x120	65	1,148
100x120	70	1,139
100x120	75	1,135
100x120	80	1,145



ANEXOS 3: ANALISIS POR MÉTODO DEL PUNTO

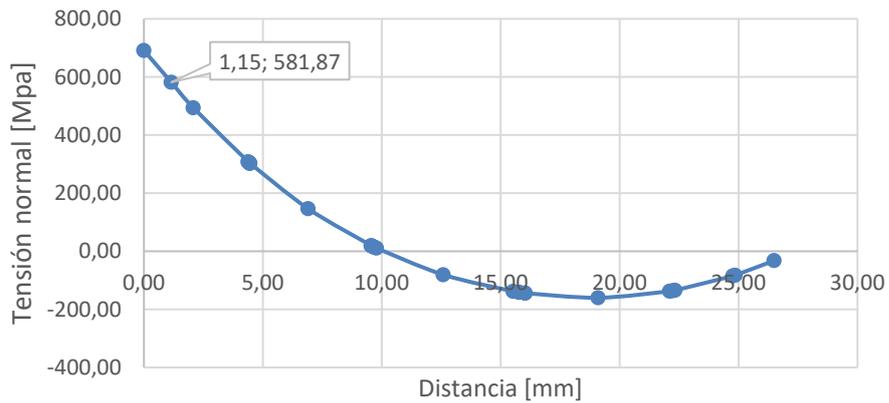
TENSIONES NORMALES MODELADAS EN PLAXIS 2D							
Arenisca Floresta		Caliza Moleanos		Mármol Macael		Mármol Carrara	
L/2	1,83 [mm]	L/2	1,15 [mm]	L/2	1,43 [mm]	L/2	4,41 [mm]
Distancia [mm]	σ_N [Mpa]	Distancia [mm]	σ_N [Mpa]	Distancia [mm]	σ_N [Mpa]	Distancia [mm]	σ_N [Mpa]
0,00	416,82	0,00	691,13	0,00	940,43	0,00	982,09
1,83	306,76	1,15	581,87	1,43	764,55	2,52	662,72
2,09	290,84	2,08	493,67	2,52	629,85	2,52	662,72
2,09	290,84	4,38	308,21	2,52	629,85	4,41	480,25
4,35	165,39	4,42	305,41	5,22	372,57	5,22	401,84
4,36	164,72	4,42	305,41	5,22	372,57	5,22	401,84
4,38	164,04	4,46	302,73	5,34	361,84	5,34	391,01
4,38	164,04	4,46	302,73	5,34	361,84	5,34	391,01
6,69	58,33	6,91	146,36	5,47	351,82	5,47	380,91
9,08	-22,82	9,56	19,27	5,47	351,82	5,47	380,91
9,10	-23,40	9,56	19,27	8,36	150,92	8,36	179,28
9,10	-23,40	9,67	14,75	11,37	0,26	11,37	29,20
9,12	-23,94	9,67	14,75	11,37	0,26	11,37	29,20
9,12	-23,94	9,78	10,56	11,79	-17,68	11,79	11,39
11,54	-77,26	12,59	-80,77	11,79	-17,68	11,79	11,39
14,00	-103,30	15,53	-138,07	12,25	-35,02	12,25	-5,80
14,00	-103,30	15,78	-141,59	12,25	-35,02	12,25	-5,80
14,02	-103,40	15,78	-141,59	15,52	-136,16	15,52	-105,92
14,02	-103,40	16,03	-144,22	15,52	-136,16	15,52	-105,92
14,03	-103,46	16,03	-144,22	16,90	-166,29	16,90	-135,76
16,50	-101,05	19,10	-159,98	17,49	-177,06	17,49	-146,45
18,99	-69,82	22,11	-137,67	18,77	-196,32	18,77	-165,65
19,00	-69,71	22,23	-136,00	18,77	-196,32	18,77	-165,65
19,01	-69,58	22,33	-134,46	21,11	-217,21	21,11	-187,02
21,50	-7,70	24,77	-84,94	21,11	-217,21	21,11	-187,02
		24,86	-82,33	21,30	-218,25	21,30	-188,13
		26,50	-32,30	21,47	-218,79	21,47	-188,74
				23,85	-218,11	23,85	-189,70
				23,85	-218,11	23,85	-189,70
				26,37	-195,64	26,37	-170,54
				26,37	-195,64	26,37	-170,54
				26,40	-195,24	26,40	-170,19
				26,43	-194,79	26,43	-169,79
				26,43	-194,79	26,43	-169,79
				28,95	-146,95	28,95	-127,34
				28,95	-146,95	28,95	-127,34
				31,50	-70,32	31,50	-58,86

Curva tensión normal y distancia zona superior de la cavidad "Arenisca Floresta"

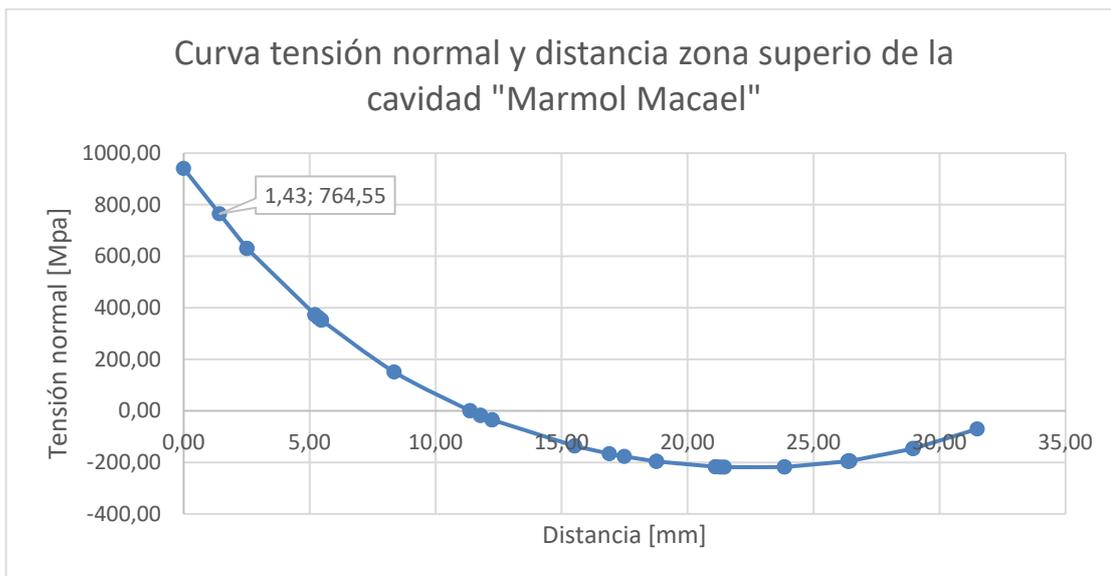


Método del Punto- Arenisca Floresta	
Área	4000 mm ²
Tensión en L/2	306,758 Mpa
Tensión rotura tracción	3,38 MPa
Factor de amplificación	0,011
Predicción de Tensión	0,011 KN/mm ²
Predicción de Tensión	11,018 MPa

Curva tensión normal y distancia zona superior de la cavidad "Caliza Moleanos"

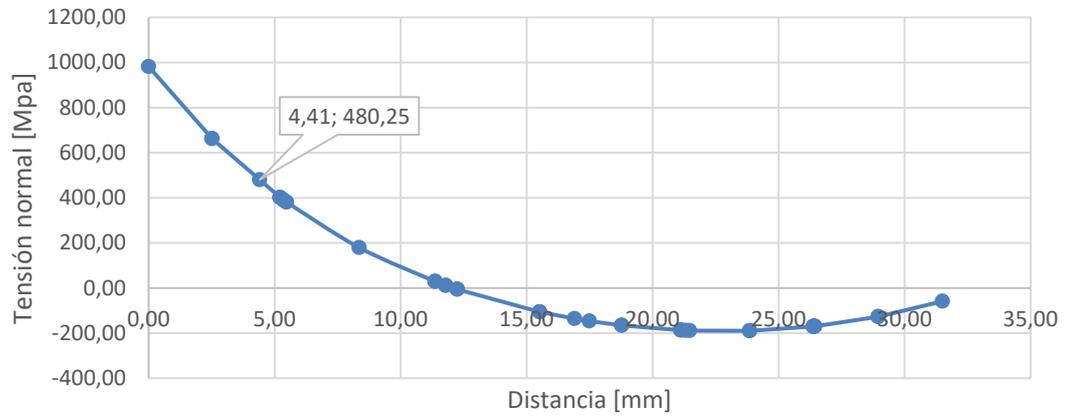


Método del Punto- Caliza Moleanos	
Área	4000 mm ²
Tensión en L/2	581,87 Mpa
Tensión rotura tracción	7,08 MPa
Factor de amplificación	0,012
Predicción de Tensión	0,01 KN/mm ²
Predicción de Tensión	12,17 MPa



Método del Punto- Mármol Macael	
Área	4000 mm ²
Tensión en L/2	764,55 Mpa
Tensión rotura tracción	8,15 MPa
Factor de amplificación	0,011
Predicción de Tensión	0,01 KN/mm ²
Predicción de Tensión	10,66 MPa

Curva tensión normal y distancia zona superior de la cavidad "Marmol Carrara"



Método del Punto- Mármol Carrara	
Área	4000 mm ²
Tensión en L/2	480,25 Mpa
Tensión rotura tracción	8,69 MPa
Factor de amplificación	0,018
Predicción de Tensión	0,02 KN/mm ²
Predicción de Tensión	18,09 MPa