



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Notas Complementarias de Geotecnia de Excavación

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Dafne Casandra Pérez Ruiz

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

M.I. Edgar Montiel Gutiérrez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



*Actúa en vez de suplicar.
¡Sacrificate sin esperanza de gloria ni recompensa!
Si quieres conocer los milagros, hazlos tú antes.
Sólo así podrá cumplirse tu peculiar destino.*

Ludwin van Beethoven

AGRADECIMIENTOS

La verdad esta parte es un poco confusa, y creo sinceramente que no me alcanzaría el papel para poder agradecerle a todas las personas que me han ayudado a llegar a donde estoy, pero simplemente quiero decir antes que nada que si alguna vez te conocí no importando si solamente hablamos casualmente, gracias.

Quiero agradecerle principalmente a mi mamá María Sandra Ruiz Ibarra por estar siempre conmigo de manera incondicional, y yo sé que pusiste muchísimo de tu parte para que yo llegara a la culminación de mis estudios, fue difícil, pero te agradezco muchísimo por todo el apoyo, y aunque algunas veces sé que quisiste tirar la toalla agradezco que no lo hayas hecho, te quiero mucho muchísimo, gracias por soportarme y por ser la mejor mamá de mundo. Igualmente quiero agradecerle a mi papá Nahum Francisco Pérez Bernabe por nunca haber perdido la fe, aunque nunca se vislumbrara claramente el final, a mi hermana Iliana Dinorah Pérez Ruiz por ser siempre mi compañera de juegos, pero a la hora de tener que decirme las cosas duras de la vida ser firme como un mástil y a mi hermana Sirce Elisa Pérez Ruiz. Les agradezco muchísimo el ser parte de mi vida y aunque no nos elegimos, no me pudo haber tocado una familia mejor.

Quiero agradecer igualmente a mis amigos de toda la vida José Antonio Barrera Mendoza por su elocuencia y paciencia al tratar conmigo, a Diana Laura López Vega, por ser la mejor conciencia que he tenido y médico de cabecera, a Fernanda Areli Barquera Madrid, por no haberme matado aun cuando tuviste muchísimas ganas de hacerlo, a Nancy Núñez Milla por ser mi compañera de fechorías y la persona que vivió mis dramas más locos, a León Ortega Díaz por enseñarme que cuando algo no es para ti es bueno cambiar de rumbo aunque signifique volver a empezar, a Marie Rojas Alfaro por tu persistencia. Les agradezco principalmente que hayan aguantado a la loca que tienen por amiga y aunque no soy muy coherente en muchos sentidos siempre estar a mi lado.

Agradecer igualmente a mis amigos de la facultad los cuales me enseñaron lo que es la camarería y trabajo en equipo, a Stephany Gómez por haber lidiado a mi lado con esos momentos los cuales no se los desearía a nadie, pero tener bien puestas sus convicciones y sacar adelante cualquier cosa que se proponga, a María Fernanda Méndez por enseñarme lo que es ser relax, pero al mismo tiempo firme y genial. Perdonen que no los mencione a todos, pero quiero decirle a todos mis amigos y compañeros de la generación 2011 (Alanis, Ulises, Chino, Pale, Uriel, Perlis, Pao, Sandy, Heriberto, Toscano, Pelcastre, Jacks, ..., y muchos más) muchísimas gracias por adoptarme, definitivamente jamás habría disfrutado esta etapa como lo hice si no los hubiese conocido, sinceramente agradezco que nos hayamos hablado hace mucho tiempo en esa clase de metamórfica.

Quiero agradecer a muchos de los maestros con los que me tope en la facultad, los cuales sé que su vocación es la enseñanza y que son maestros por el hecho de transmitir sus conocimientos.

Al Ing. Luis Arturo Tapia Crespo, por enseñarme con sus clases lo bella que es la Geología justo en un momento decisivo de mi vida, al Ing. José Luis Arcos Hernández por resolver cada duda que tenía, aunque fuese súper tonta la pregunta no importando las veces que me lo tenía que repetir lo hacía con gusto y enseñarme el amor por la geología estructural, al M.C. Noé Santillán Piña por enseñar la sedimentología de una manera muy fácil y comprensible, al Dr. Moisés Dávila Serrano por ser el primero en mostrarme lo genial que es la geología aplicada a la ingeniería civil, al Ing. Alberto Arias Paz aunque nunca tome clase con usted me enseñó lo valioso que es servir a la gente, cada vez que necesite ayuda con alguna materia usted siempre estuvo dispuesto a apoyarme, al Ing. Gabriel Salinas Calleros porque

cuando tome clase con usted me enseñó como es el dedicarse a lo que realmente le apasiona, a la M.I. Isabel Domínguez Trejo tuvo el honor y el privilegio de ser la primera generación a la que les enseñó estratigrafía, y quiero decirle que lo agradezco muchísimo, cuando usted llego se veía tan seria e intimidante, pero rápidamente se ganó nuestros corazones, y si no el de todos, el mío sí, le agradezco principalmente el estar conmigo y apoyarme en todo lo que estuviera a su alcance, por ser una muy muy buena profesora y una excelente amiga. Muchas gracias a todos ustedes, porque a pesar de ser mis profesores los considero amigos y personas muy importantes en mi desarrollo académico y personal, si bien nunca fui una alumna ejemplar probablemente a veces era más un problema que una bendición, nunca me peso el entrar a sus clases porque la verdad eran súper genialosas, gracias por ser una fuente de inspiración y una guía.

M.I. Edgar Montiel Gutiérrez, un amigo me recomendó tus clases, me dijo, “es una de las materias más difíciles que he tomado a lo largo de la carrera pero vale totalmente la pena”, y déjame decirte que no se equivocó, gracias por ser un amigo desde el primer instante en el que pusiste un pie en el aula, te respeto por tu increíble intelecto y la facilidad por transmitir tus conocimientos, nunca olvidare ese semestre en el que prefería tus clases a la que tenía después, jamás me peso quedarme hasta tarde, porque me embriagaba el hambre de conocimiento que podía tener con tu tutoría, sé que soy difícil de manejar, gracias por dejar que me mostrara tal y como era, por estar en los momentos en que lo necesitaba, por ser un excelente profesor y un muy buen amigo.

Juro solemnemente que todo lo dicho aquí es la verdad, y como dicen en **HP** “*La verdad es una cosa terrible y hermosa, y por lo tanto debe ser tratada con gran cuidado*”, (no sé si tengo que citar la frase anteriormente dicha), como saben nunca me ha gustado ser muy formal, por eso por lo menos mis agradecimientos quería que fuesen tal cual los pensaba, así que si llegaron hasta aquí sé que hay muchas cosas que no deberían estar en una tesis y no son formales, pero es mi trabajo y son mis agradecimientos, y recuerden que me gusta lo irreverente, después de mis agradecimientos les prometo que es todo seriedad.

Sé que he dicho mucho “gracias” pero hay veces en los que no basta con uno, ni con diez o mil o un millón, así que englobare todos esos gracias en un gigantesco GRACIAS.

Y ahora,
adentrémonos en la obscuridad y vayamos en busca de la aventura,
aquella caprichosa seductora.

HP y el Príncipe Mestizo

Capítulo 3

ÍNDICE

Introducción	6
Objetivo	7
Desarrollo	8
Conclusiones y recomendaciones	111
Bibliografía	112

I.- INTRODUCCIÓN

Dada la falta de este tipo de documentos en la literatura en español y puesto que la materia tiene pocos antecedentes en la carrera de ingeniería geológica, resulta bastante atractivo y necesario hacer una recopilación de conocimientos práctica para poder facilitar y agilizar su comprensión de una manera fácil y concisa.

Al cursar la materia de Geotecnia de Excavación me pude dar cuenta de las deficiencias con las que se llega a la materia y el cubrirlas por el mismo alumno a veces no resulta de la mejor manera, ya que para aprender sobre este tema se tiene que revisar mucha bibliografía, y no siempre el alumno alcanza a entender el tema por completo, por eso surgió la necesidad de hacer unas notas complementarias que pudieran hacer este proceso más fácil, donde el alumno tenga en sus manos los temas que se verán en clase o que son importantes como antecedentes para que el curso se desarrolle de manera rápida y se puedan ver los temas prácticos con mayor extensión en el semestre y con un mayor entendimiento.

Las notas engloban temas básicos como lo son definiciones y explicación sobre la utilización e implementación de la geotecnia que sirven como antecedentes e igualmente para que el alumno pueda saber en qué temas tiene deficiencias y con ayuda de las notas pueda mermar un poco dichas carencias para así poder llegar a comprender temas más complejos que igualmente se tratan en este escrito.

OBJETIVO

Proporcionar al alumno un documento guía que lo apoye a la toma de decisiones, tipos de análisis y medios de revisión de datos para dar un seguimiento adecuado a los diversos tipos de excavaciones en los diferentes ambientes geológicos que estudian las materias de mecánica de suelos y mecánica de rocas.

Así mismo poder darle un medio de consulta rápido y eficiente con el cual pueda resolver dudas sobre la materia o simplemente un libro de consulta.

DESARROLLO

El desarrollo de este proyecto fue más que nada una recopilación de diversas bibliografías referentes a la geotecnia, se desarrolló para ser apoyo en la asignatura y poder tener unas “notas” en las cuales se pueda tener un acercamiento de los conocimientos básicos de la geotecnia.

El trabajo se basa en dar al alumno las premisas para poder hacer un buen análisis geotécnico, iniciando por definiciones básicas y posteriormente subiendo la dificultad de los temas hasta llegar a lo que son los criterios de rotura.

Se toman en cuenta todas las variables que pueden influir a la hora de realizar una excavación, como lo es la presencia de agua, el tipo de discontinuidades que presenta el macizo, si es un suelo o una roca y las características que rigen cada una de ellas.

Igualmente abarcan las utilidades de los análisis geotécnicos en las diversas ramas de la geología como la minería, civil, petróleo e inclusive para guardar residuos nucleares. Es un compilado de los conocimientos requeridos necesarios para poder aprobar la materia y tener conocimientos útiles en la vida laboral.

Sin más por agregar se presenta a continuación el escrito en el cual se trabajó y el cual será utilizado en la materia de geotecnia de excavación, se hace la aclaración que lleva una numeración diferente debido a que el material será presentado de manera separada a este trabajo.

**Universidad Nacional
Autónoma de México**

Facultad de Ingeniería



Geotecnia de Excavación

Profesor: M. I. Edgar Montiel Gutiérrez

**NOTAS COMPLEMENTARIAS DE
GEOTECNIA DE EXCAVACIÓN**

Pérez Ruiz Dafne Casandra



Dic/2017



Geotecnia de Excavación

I.-	Introducción	5
II.-	Objetivo	12
III.-	¿Qué es la geotecnia?	13
	3.1 Definiciones básicas	13
	3.2 Premisas de la geotecnia en su aplicación a proyectos donde se desarrollan excavaciones	15
	3.3 Estudios geotécnicos	18
	3.4 Tipos de comportamiento del terreno	20
IV.-	Geotecnia e Ingeniería	23
V.-	Macizos rocosos y suelos	27
	5.1 Diferencias básicas entre mecánica de rocas y de suelos	27
VI.-	Aplicaciones de la geotecnia en la ingeniería	30
	6.1 Minería	30
	6.1.1 Minería a cielo abierto	30
	6.1.2 Minería subterránea	31
	6.2 Ingeniería civil	32
	6.3 Petróleo	33
	6.4 Residuos nucleares	34
VII.-	El proceso de excavación	35
VIII.-	Excavaciones superficiales	36
IX.-	Excavaciones subterráneas	43
X.-	Caracterización geotécnica	47
	10.1 Identificando las respuestas del terreno	47
	10.2 Clasificación de suelos	48
	10.2.1 Tamaño	48
	10.2.2 Gradación	48
XI.-	Clasificación de macizos rocosos	52
	11.1 Resistencia de la roca intacta	54
	11.1.1 Ensayo de compresión simple	54
	11.1.2 Ensayo de carga puntual	54
	11.1.3 Ensayo triaxial	55

11.1.4 Ensayos para determinar la resistencia de tracción	55
11.2 Aguas subterráneas	56
11.3 Efecto de los esfuerzos	57
11.3.1 Esfuerzos in situ	57
11.4 Espesor de fracturas, grado de alteración, planos de contacto y forma de las discontinuidades	58
11.4.1 Discontinuidades lisas	58
11.4.2 Discontinuidades rugosas sin relleno	59
Criterio de rotura de juntas de Barton	59
Interpretación del criterio de Barton	60
Efecto Escala	60
Fricción y cohesión instantáneas de Barton	60
11.4.3 Discontinuidades abiertas	60
11.4.4 Discontinuidades con relleno	61
11.4.5 Influencia de la presión de agua	62
11.4.6 Parámetros deformacionales (rigidez y dilatación)	62
Rigidez cortante o tangencial	62
Rigidez normal	63
Dilatación	63
11.4.7 Ensayos de Laboratorio	63
11.4.7.1 Ensayo de corte directo	63
11.4.7.2 Ensayo de inclinación de laboratorio para obtener el ángulo de fricción básico	64
11.5 Otros factores que influyen en la clasificación son:	64
11.5.1 Tensión efectiva, hinchamiento y alterabilidad de las rocas	64
Tensión efectiva	64
Hinchamiento y alterabilidad	65
Ensayos	65
Composición	66
Zona de debilidad	66
11.6 Puntos a tomar en cuenta en la clasificación:	67
11.6.1 Efecto de terremotos y voladuras inducidas por vibraciones	67
11.6.2 Efectos del tamaño y la forma de excavación	67
11.7 Criterios de clasificación geomecánica	67
11.7.1 ¿Qué es la clasificación MRI?	67



11.7.2 ¿Qué es la clasificación RQD?	68
11.7.3 ¿Cual es la clasificación RMR?	68
11.7.4 ¿Qué es el índice de calidad Q? (Clasificación de Barton)	69
11.7.5 ¿Cual es la clasificación GSI? (Geological Strenght Index)	70
11.7.6 Efecto de la excavación y la instalación del soporte en las rocas	71
11.8 Método de excavación	71
XII.- Criterios de resistencia y comportamiento de la falla del continuo	73
12.1 Rotura frágil de las rocas	73
12.2 Criterio de rotura de Mohr-Coulomb	75
12.3 Criterio de rotura de Hoek-Brown	78
XIII.- Análisis Numérico	80
13.1 Características de los métodos numéricos	81
13.2 Tipos de problemas	81
13.3 Áreas de estudio del análisis numérico	82
XIV.- Ejemplos	84
14.1 Ejemplo 1 Proyecto Jongos	84
14.2 Ejemplo 2 La Yesca	95
XVI.- Bibliografía	101



I.- INTRODUCCIÓN

Con la intención de darle al alumno de la materia “Geotecnia de la Excavación”, un marco de referencia y datos concernientes al entorno en que se desarrolla esta materia, estas notas se han realizado a fin de ayudar a comprender los principios físicos y detalles técnicos de cada uno de los componentes que integran una excavación en sí.

De acuerdo con el “*Standard Handbook for Civil Engineers, Fourth Edition (2004)*”, las excavaciones en su definición más básica son un proceso para el retiro de materiales que se encuentran en la superficie terrestre. Los motivos para remover el material y que muchas veces implican grandes volúmenes, pueden ser el aprovechamiento de un recurso mineral tal es el caso de minería (Imagen 1), o bien alojar una estructura como un túnel, un estacionamiento subterráneo o el espacio para la casa de máquinas de una presa en el caso de la ingeniería civil (Imagen 2).

Una vez que se inicie el desarrollo de la excavación sea cual sea su motivo, es necesario entender sus niveles de estabilidad a fin de mantener la seguridad de una obra o bien reducir al mínimo los efectos en el entorno; las paredes y techos que conformarán la **excavación terminada**, es decir la geometría del hueco, son el primer motivo que induce al cálculo de la estabilidad del terreno.



Imagen 1.- Túnel minero, el cual se utiliza para movilización dentro de la mina o sacar material, estas estructuras comúnmente son temporales.¹

¹ Recuperada de: <http://magna-trivium.blogspot.mx/2011/>



Resulta esencial que para desarrollar una excavación se requiere contar con el entendimiento del comportamiento del terreno, siendo la geotecnia, la encargada de ayudar en la definición no solo de los niveles de estabilidad sino del comportamiento del terreno ante las modificaciones y sus procesos.

En su enfoque más práctico; la geotecnia constituye un marco de aplicación de la mecánica, a la comprensión de la respuesta de diversos medios geológicos ante los cambios en los esfuerzos que puedan ocurrir en ellos o en su alrededor. El motivo de dichas variaciones puede producirse de forma natural o antrópica; siendo ésta la principal causa del desarrollo de esta área (EMG, 2017).



Imagen 2.- Tuneladora realizando túnel ferroviario, este tipo de obras requieren de una gran estabilidad dado que su carácter es “permanente”, Túnel Guadarrama Madrid, España.²

En este sentido la evaluación del comportamiento y la estimación de la estabilidad de los materiales geológicos donde ocurre una excavación (superficial o subterránea) son el tópico que da origen a la asignatura “Geotecnia de excavación”, que se imparte en la Facultad de Ingeniería en la UNAM, la cual basa sus fundamentos en la correcta o más acertada aplicación de la mecánica, a la comprensión de las interacciones que se tienen en los diversos ambientes geológicos donde el ser humano requiere de desarrollar excavaciones para distintos proyectos de ingeniería civil, minería, petrolera, nuclear, etc. (Imagen 3).

² Recuperada de: <http://www.ciudadfcc.com/en/-/tunel-de-guadarrama>

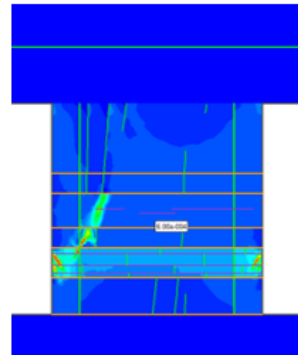


Imagen 3.- Simulación matemática de la rotura de un pilar estratificado, al integrar los detalles geológicos y considerar apropiadamente las condiciones de esfuerzos, se puede lograr mediante matemáticas la reproducción del fenómeno, con ello se identifican las problemáticas que sufre el proyecto, permitiéndonos estimar condiciones de peligro o probables mejoras que debamos realizar al proyecto en sí.³

Se debe señalar que los materiales con los que se puede “trabajar” en el ámbito geotécnico, quedan acotados a suelos y rocas en la parte “superficial” de la corteza terrestre (cuyo espesor va desde 35km a un máximo de 70 km en la corteza continental)⁴ sin entrar en condiciones inherentes al manto o zonas de mayor profundidad.

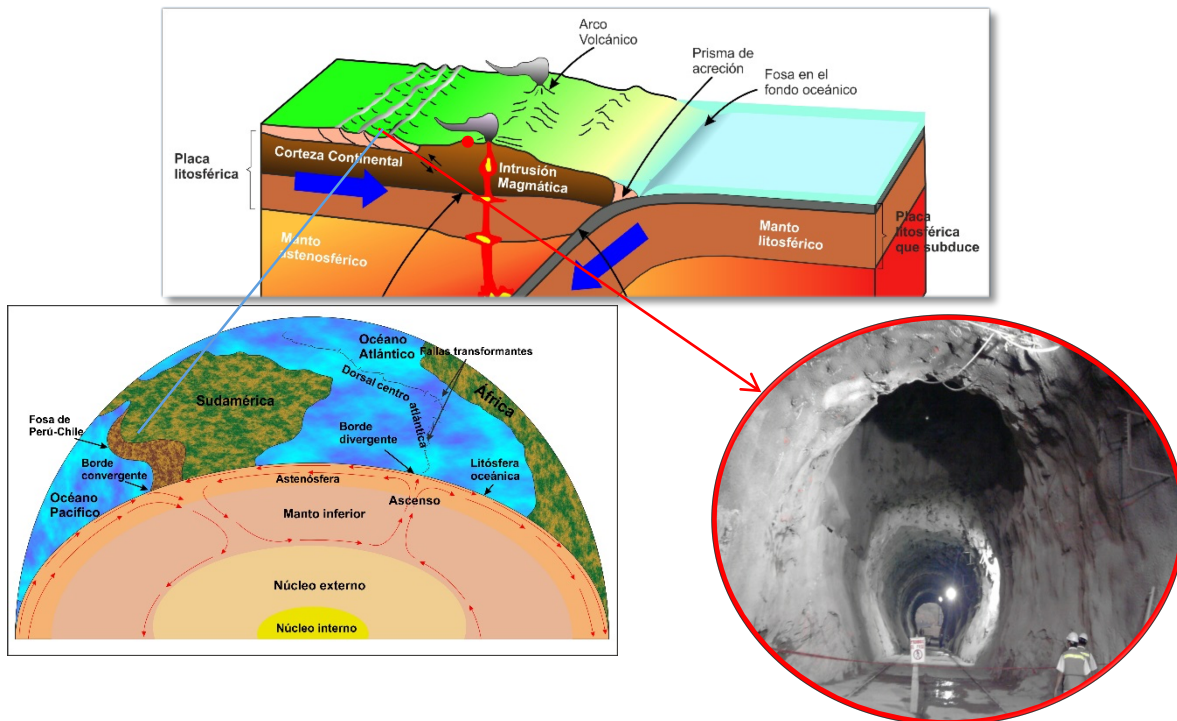


Figura 1.- Sentido geotécnico de escala.⁵

³ Recuperada de las presentaciones del M. I. Edgar Montiel 2016.

⁴ Tarbuck E. J., Lutgens F. K., Ciencias de la Tierra, Octava edición, 2005 p. 736.

⁵ Imagen tomada del manual de trabajos geológicos de campo, apartado de geotecnia.



Esto claramente le da un sentido de escala (Figura 1) al campo de acción en el que se desarrolla la geotecnia, dictando que los estudios o revisiones que se requieran en la geotecnia deberán de profundizarse hasta donde se observe que el proyecto puede afectar al terreno en sí y no más allá, a menos de que alguna otra disciplina (ingeniería ambiental, por ejemplo) lo requiera.

Desde el punto de vista geotécnico, la recolección de información debe de ser abundante en cuanto a las características que permitirán la conceptualización del comportamiento del terreno dentro de dicha escala.

En la ingeniería civil, particularmente en las cimentaciones de obras de infraestructura, las profundidades máximas de las cimentaciones son de poco más de 50 metros⁶, por otro lado, en las excavaciones de las obras civiles de centrales hidroeléctricas (túneles o casas de máquinas), se han logrado obras con profundidades mayores a los 2000 metros, como es el caso del túnel San Gotardo en Suiza, el cual tiene una longitud de 57.5 km, la tuneladora con la que se hizo este túnel tiene 9m de diámetro (Imagen 4), sus dimensiones de altura son de 7.10m y donde va el tren hasta su base es de 1.90m como se ve en la imagen 5 en algunos de los tramos de esta obra ingenieril alcanza una profundidad de hasta 2000m (Imagen 6), tardó en construirse 17 años.



Imagen 4.- La tuneladora utilizada en la creación del túnel San Gotardo, tiene un diámetro de 9 m y una longitud de 400m.⁷

⁶ Edgar Montiel, Clase de Geotécnica de Excavación, 2017

⁷ El Heraldo, 1 de junio 2016, <https://www.elheraldo.co/internacional/inauguran-tunel-ferroviario-del-san-gotardo-y-pasan-los-primeros-dos-trenes-263959>.

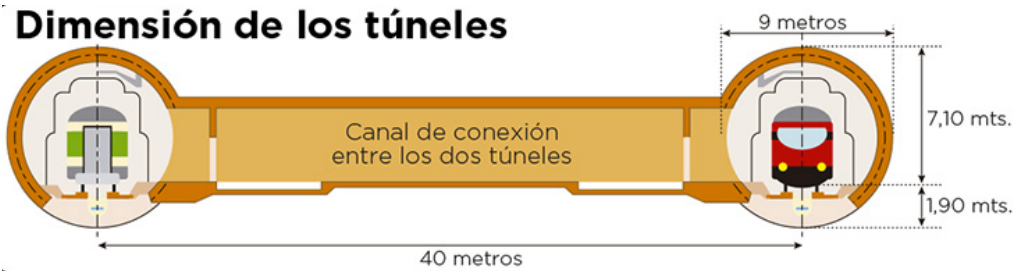


Imagen 5.- Dimensión de los túneles de San Gotardo.⁸

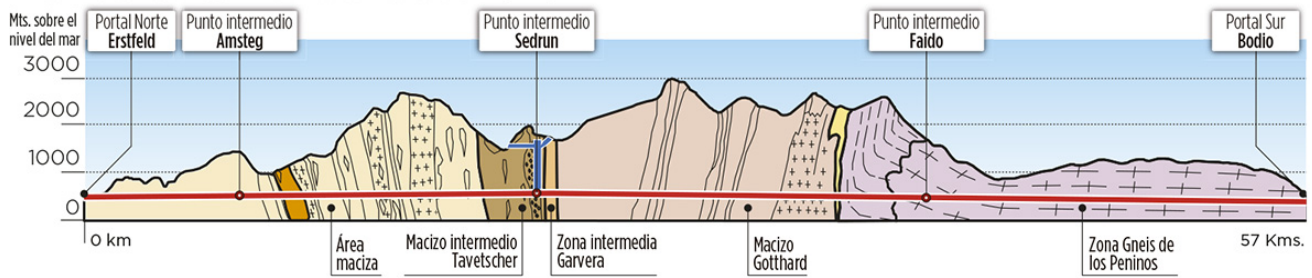


Imagen 6.- Se puede apreciar en esta imagen la profundidad que alcanza en algunos lugares el túnel, así como la geología presente.⁹

En obras de ingeniería de minas se alcanzan más de 1000 m de profundidad, un claro ejemplo de ello es la **mina de oro de Mponeng** (Imagen 7) con sus imponentes 3900 metros de profundidad propiedad de AngloGold Ashanti, ubicada en el suroeste de Johannesburgo, en Sudáfrica, la cual se coronó como la mina a cielo abierto más profunda jamás excavada.



Imagen 7.- Mina de oro Mponeng, tiene 3900 metros de profundidad, ubicada en Sudáfrica.

En resumen, los temas que se abordan en el contexto de una excavación desde el punto de vista geotécnico se acotan principalmente a la aplicación de análisis físicos de medios geológicos con la ayuda

⁸ El Heraldo, 1 de junio 2016, <https://www.elheraldo.co/internacional/inauguran-tunel-ferroviario-del-san-gotardo-y-pasan-los-primeros-dos-trenes-263959>.

⁹ El Heraldo, 1 de junio 2016, <https://www.elheraldo.co/internacional/inauguran-tunel-ferroviario-del-san-gotardo-y-pasan-los-primeros-dos-trenes-263959>.



de manejo matemático en temas como *esfuerzos, deformaciones, comportamiento de geo-materiales, anisotropía, respuesta de discontinuidades, métodos numéricos (elementos finitos y elementos discretos), soportes y sostenimientos*. Los temas tratados, son de carácter básico o introductorio a fin de comprender las aplicaciones directas a los análisis geotécnicos de excavaciones y los cuales serán afines las materias de mecánica de rocas, mecánica de suelos, geología aplicada a la ingeniería civil y por supuesto calculo vectorial y ecuaciones diferenciales.

El uso de estas notas permitirán al alumno abordar los procedimientos existentes en la literatura y avalados en la práctica profesional tanto analíticos como numéricos, para los cuales se utilizan programas especializados, para el análisis de estabilidad mediante ecuaciones diferenciales aplicado a excavaciones subterráneas o superficiales (Imagen 8 y 9).



Imagen 8.- Excavación subterránea de un túnel, en la que se realiza un recubrimiento para darle mayor estabilidad (Izquierda)¹⁰, y excavación de talud en zona residencial (Derecha)¹¹.

A su vez se estudiarán los criterios de rotura más utilizados en el ámbito geotécnico, pasando por las clasificaciones geomecánicas necesarias para establecer con qué tipo de macizo rocoso se está tratando o bien utilizando el Sistema Unificado para Clasificación de Suelos (SUCS).

Dado que la respuesta de los materiales geológicos será la base del estudio de esta materia, se realizará una introducción a la diferenciación conforme al tipo de material, ya sea roca o un suelo, llamado caracterización geotécnica, estableciendo los puntos importantes que la geología y su respuesta a pruebas en campo y laboratorio condiciona a su comportamiento.

¹⁰ Imagen obtenida de: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_Tuneles/CAP07.pdf

¹¹ Recuperada de: https://fotos.habitissimo.es/foto/excavacion-talud-montana_995844



Imagen 9.- Excavación superficial de una mina a cielo abierto donde se extrae material para su explotación, las estructuras y taludes que se crean comúnmente son temporales.¹²

En cuanto a su impacto en los principios de la ingeniería; se mostrará al alumno la trascendencia de la ingeniería geotécnica en cuanto a las recomendaciones y su objetividad en el proyecto, brindando opiniones que decantarán en optimizaciones de costo, cumplimiento de estándares de seguridad y eficiencia.

Como corolario de este texto se introducirá al alumno en el ámbito de las simulaciones matemáticas, las cuales apoyarán y respaldarán las recomendaciones del geotecnista, observando a través del análisis esfuerzo-deformación las peculiaridades de los métodos de excavación y colocación de soportes en la respuesta de los medios geológicos.

¹² Imagen recuperada de: <http://integracion.info/?p=3828>



II.- OBJETIVO

El objetivo de este documento es el de proporcionar al alumno una guía de consulta que lo apoye en la comprensión de los temas básicos de la materia; mostrando de forma didáctica los conceptos y uso de las teorías en que se basa la geotecnia aplicada a las excavaciones.

A su vez, ayudará a la toma de decisiones en cuanto a los tipos de análisis y medios de revisión de datos para dar un seguimiento adecuado a los diversos tipos de excavaciones en los diferentes ambientes geológicos que estudian las materias de mecánica de suelos y mecánica de rocas.

Finalmente encaminará al alumno a la revisión de documentos especializados en este tema abriendo el interés en la profundización de información dirigida a problemas particulares inherentes a las excavaciones.



III.- INGENIERÍA EN LA EXCAVACIÓN; ¿QUÉ ES LA GEOTECNIA?

La geotecnia es una disciplina que se encarga de definir la respuesta mecánica de los ambientes geológicos ante modificaciones. Como se mencionó en la introducción se basa en la aplicación de temas ingenieriles en conjunto con la geología para poder determinar el cambio de esfuerzos al modificar un medio geológico y mediante este análisis anticipar su comportamiento.

3.1 DEFINICIONES BÁSICAS

La geotecnia se rodea de amplias definiciones, cuya trascendencia radica en la correcta interpretación de procesos o resultados obtenidos en sus análisis. A continuación, se escriben algunos conceptos básicos en la geotecnia de excavación, lo que ayudara al estudiante en el aprovechamiento óptimo de la información aquí descrita.

- “CHILE”: acrónimo para descripción de materiales continuos; Continuo, Homogéneo, Isótropo, Linealmente elástico.¹³
- “DIANE”: acrónimo para la descripción de materiales discretos; Discontinuo, Inhomogeneo, Anisótropo, No elástico.¹⁴
- Creep: fenómeno producido por la acción de esfuerzos constantes, se presenta una deformación continua. Para que exista el creep son necesarios tres factores, la temperatura, el agua y los seres vivos. Las variaciones de temperatura y humedad son suficientes para desencadenar movimiento. El creep es un fenómeno típico de meteorización ya que los materiales involucrados suelen alterarse in situ o con un ligero desplazamiento por gravedad. Sin embargo, también puede desencadenar procesos erosivos en pendiente.¹⁵
- Deformación: es el cambio que sufre un objeto al alterar alguno de sus valores predeterminados con los que se encuentra en equilibrio, y matemáticamente sería el valor normalizado del movimiento.¹⁶
- Discontinuidad: se refiere a cualquier separación dentro una roca continúa causando que en esa zona los esfuerzos tengan un valor de efectividad de cero son las que hacen que el mecanismo de un macizo sea único, y son usadas como una connotación genética; las fallas y las fracturas son discontinuidades.¹⁷

¹³ Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997

¹⁴ Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997

¹⁵ Arthur N. Strahler. Physical Geography. New York: John Wiley & Sons, 1960, 2nd edition, 7th printing, p. 318-319

¹⁶ Edgar Montiel, Clase de Geotécnia de Excavación, 2017.

¹⁷ Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997



- Elasticidad: teoría que relaciona los esfuerzos con la deformación de una manera independiente del tiempo. Toda la energía de la deformación es recuperable. Se asume, en este contexto, que los materiales elásticos permanecen elásticos y por lo tanto tienen una resistencia infinita.¹⁸
- Elemento rocoso: conjunto de rocas de un mismo tipo o diferentes.¹⁹
- Esfuerzo: abstracción con dirección y magnitud que actúa sobre el plano de referencia, al que se le denomina como tensor.²⁰
- Excavación: modificación a un medio ya existente en el cual se extrae parte de su contenido cortando un macizo rocoso.²¹
- Macizo rocoso: se define como el medio in-situ más la suma de discontinuidades como diaclasas estratos fallas y otros rasgos estructurales.²²
- Mecánica de rocas: disciplina que estudia el comportamiento de mecánico de las rocas y de los macizos rocosos. Es la rama de la ingeniería dedicada al estudio de la respuesta de las rocas y macizos rocosos al campo de fuerzas que actúan en su entorno.²³
- Mecánica de suelos: Parte de la ingeniería que se ocupa del estudio de los sedimentos depositados en el periodo Cuaternario, se encargan de su clasificación y por este medio determina su comportamiento conforme a su estructura y contenido, poniendo énfasis en las diversas condiciones que afectan su resistencia y manejo²⁴.
- Parámetros geomecánicos: medidas que determinan el comportamiento de los materiales, ya sea de los suelos o de las rocas, dentro de un criterio establecido.
- Plasticidad: se produce cuando al aplicar un esfuerzo llega a un punto crítico en el que la deformación que provocan es irreparable. La energía de la deformación se pierde a través de un esfuerzo plástico permanente. Generalmente el comportamiento plástico funciona para distorsionar y desviar los esfuerzos.²⁵
- Proceso: conjunto de actividades planificadas que implican la participación de un número de personas y de recursos materiales coordinados para conseguir un objetivo previamente identificado²⁶.

¹⁸ Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997

¹⁹ Tarbuck E. J., Lutgens F. K., Ciencias de la Tierra, Octava edición, 2005 p. 736.

²⁰ Edgar Montiel, Clase de Geotécnia de Excavación, 2017.

²¹ Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997

²² Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

²³ Montiel, E. 2016

²⁴ Montiel, E. 2016

²⁵ Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997

²⁶ Obtenido de <https://www10.ujaen.es/sites/default/files/users/archivo/Calidad/Criterio5.pdf>



- Proyecto: conjuntos descritos, cálculos y dibujos que se hacen para dar idea de cómo ha de ser y lo que ha de costar una obra de arquitectura o de ingeniería²⁷.
- Reología: Es la relación que existe entre la deformación y el flujo de la materia lo que se conoce como viscoelasticidad, que es un comportamiento tanto plástico como elástico.²⁸
- Roca: conjunto de minerales acrecionados.²⁹
- Roca intacta: elemento rocoso que no presenta discontinuidades, roca sana.³⁰
- Suelo: en el sentido geotécnico se define como un aglomerado de minerales, materia orgánica y sedimentos sin o con poca cohesión,³¹ depositados sobre el lecho de roca que es donde se desarrollan las actividades humanas y biológicas. Los suelos se rompen y se disgregan con cierta facilidad debido a sus constituyentes. Se componen por tres fases sólidos, líquidos y gases.³²
- Suelos residuales: cuando el material proveniente de la desintegración de la roca permanece en el lugar de origen.³³
- Volumen Elemental Representativo (VER): es el volumen sacado de una muestra la cual tiene un número suficiente de in-homogeneidades para sacar un valor promedio, y es razonablemente consistente en pruebas repetidas, esto quiere decir que en cuanto más discontinuidades presente la muestra más representativa es.³⁴

3.2 PREMISAS DE LA GEOTECNIA EN SU APLICACIÓN A PROYECTOS DONDE SE DESARROLLAN EXCAVACIONES

Cuando se requiera de la geotecnia para el desarrollo de una excavación o revisión de algún comportamiento del terreno, es importante puntualizar los siguientes enunciados a fin de generar un “juicio ingenieril” lo suficientemente preciso:

- Se deberá asignar un conjunto de parámetros geomecánicos a los materiales con los que se va a trabajar en la obra, que se pueden medir a través de ensayos estándar o bien en campo; de acuerdo a los procesos geológicos que se han producido en el sitio, las “heterogeneidades”,

²⁷ Obtenido de La RAE (La Real Academia Española).

²⁸ Definición obtenida del Dr. Moisés Dávila

²⁹ Tarbuck E. J., Lutgens F. K., Ciencias de la Tierra, Octava edición, 2005 p. 736.

³⁰ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

³¹ Edgar Montiel, Clase de Geotécnica de Excavación, 2017

³² Tarbuck E. J., Lutgens F. K., Ciencias de la Tierra, Octava edición, 2005 p. 736.

³³ TUCKER, Maurice E., Sedimentary Rocks in the Field, 4th edition, Chichester Wiley, 2003

³⁴ Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997

“discontinuidades” o “defectos” geológicos, cobrarán mayor o menor importancia si el medio se considera o no continuo.

- El proceso de excavación y sus etapas producirán remoción de material ya sea superficial o subterránea formada por el terreno (macizo rocoso, suelo y/o cualquier otro material geológico) elementos de sostenimiento y/o soportes, cuya interacción “integral” se analizará a partir de los principios de la mecánica clásica.
- A partir de la experiencia en el desarrollo de las excavaciones, la revisión de casos históricos, la aplicación de métodos analíticos, modelizaciones numéricas o asociatividad; se debe tener en cuenta que el objetivo principal es: “predecir y controlar el comportamiento del terreno (macizo rocoso, suelo o etc.) en el que se realiza una excavación”³⁵ ya que al haber una modificación en los esfuerzos preexistentes de la zona se tiene que conocer la influencia de éstos para poder implementar bien la modelización requerida.
- La correcta aplicación de la geotecnia en una excavación puede asegurar o incrementar la rentabilidad económica, lo que se ha de traducir en la práctica en la eficiencia (máxima eficacia) en el ámbito económico y operativo, medida en diversos términos como pueden ser recuperación de mineral (% de mineral extraído), productividad o directamente de rentabilidad económica, todo esto sin olvidar la seguridad operacional de la obra.

Dentro de las premisas anteriores, existe un punto en el que será importante enfatizar: los “esfuerzos” (Imagen 10) y su efecto en el terreno.

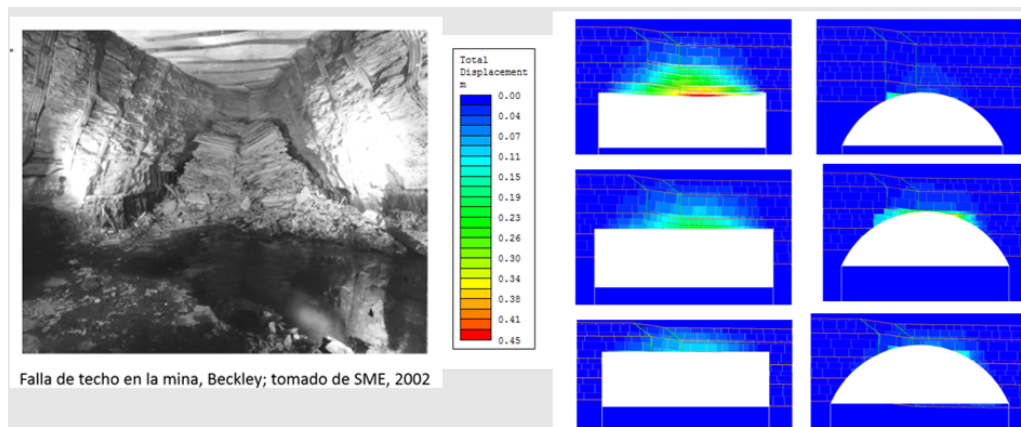


Imagen 10.- Simulación de la falla de techo de la mina Beckley, y la efectividad de haber considerado un techo curvo en vez de plano, aquí se denota el impacto de los esfuerzos y la estructura geológica en las geometrías que implican los proyectos de ingeniería.³⁶

A continuación, se muestra un diagrama de flujo (Fig. 2) que integra los puntos importantes a considerar al realizar un procedimiento de excavación:

³⁵ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

³⁶ Edgar Montiel, Clase de Geotécnia de Excavación, 2017

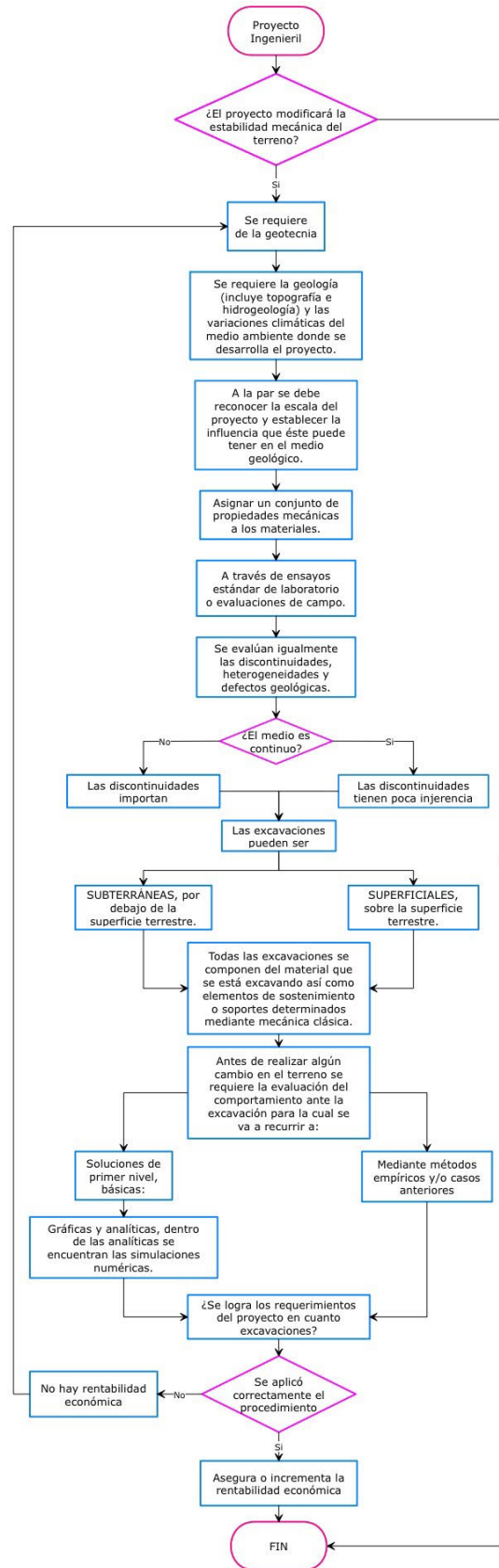


Fig. 2.- Diagrama de flujo como guía de la realización de un proyecto ingenieril en el cual se tenga que implementar la geotecnia de excavación.



Si bien, la geología será la encargada de dar el modelo de trabajo para el desarrollo de la excavación, son los esfuerzos los que permitirán anticipar si la forma geométrica, el proceso de excavación o bien la resistencia del medio, serán los responsables de perjudicar o reducir la estabilidad.

Hudson, enuncia tres razones básicas por las cuales es importante estudiar los esfuerzos en el contexto de las excavaciones en el terreno³⁷:

- a) Para poder aplicar un análisis de diseño adecuado es necesario entender el estado de esfuerzos preexistente en el medio.
- b) Cuando se modifica el medio al realizar una obra ingenieril ocurre un cambio en los esfuerzos, esto quiere decir que el estado de esfuerzos preexistente antes que el medio se transformara, cuando se realiza una extracción de material, la carga que anteriormente se sostenía queda volando, por lo tanto, se tienen que tomar de otra parte. Los criterios de ingeniería se relacionan con la deformabilidad o la resistencia en la que se tienen que realizar análisis de simulación numérica tomando en cuenta los esfuerzos.
- c) Los esfuerzos son tensores, y no son algo con lo que interactuamos de manera cotidiana.

Es importante mencionar que el alumno debe tener conocimientos previos de cálculo diferencial, vectorial, ecuaciones diferenciales, análisis numérico, así como de mecánica de suelos y de rocas ya que la aplicación de estas ramas es lo que le da origen a la geotecnia como la conocemos.

3.3 ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Los estudios que la geotecnia necesita para obtener características del terreno que permitan la aplicación de sus metodologías o bien el juicio ingenieril; requieren de su desarrollo con rigor y bajo el marco de la normativa de referencia aceptada en el ámbito de la ingeniería. Para poder realizar dichos procedimientos (los cuales se deben de ver en materias básicas como mecánica de rocas o mecánica de suelos) se debe tener en mente los siguientes datos:

- a) Estudios geológicos detallados de la zona en la que se realizará el proyecto, así como los perfiles y plantas (o mapas 3D) donde se ubiquen ensayos que se requieran de laboratorio y campo

³⁷ Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997 p. 31

- b) Para los estudios geotécnicos es importante saber delimitar las escalas, esto debido a que comparada con la escala geológica (la cual es muy grande) solo se incluye aquello que realmente podría afectar la estructura que está por crearse.
- c) Puntualizar la localización de la obra, litología, así como fallas o discontinuidades que afecten o puedan afectar la obra a realizar y las propiedades geotécnicas del material.
- d) Contar con estudios hidrogeológicos y zonificación de los diversos medios (acuíferos, acuitardos, acuicludos, etc.) para considerar el panorama sobre la distribución de presiones de agua en el dominio afectado por la excavación, se deberá contar con evaluaciones piezométricas.
- e) Saber bien la distribución de esfuerzos encontrados en el medio a modificar, ya que al alterar el entorno los esfuerzos existentes igualmente se transforman y podrían causar inconvenientes en la obra.

Es importante reconocer que los valores obtenidos de los estudios desarrollados por la geotecnia, dependerán en mayor o menor escala dependiendo de la “representatividad” que tengan las pruebas del medio a analizar; teniendo en consideración la definición de “*volumen elemental representativo (VER)*”, como se menciona anteriormente en las definiciones básicas, es el volumen sacado de una muestra la cual tiene un número suficiente de in-homogeneidades para sacar un valor promedio, y es razonablemente consistente en pruebas repetidas, esto quiere decir que en cuanto más discontinuidades presente la muestra más representativa es, este concepto se aplica a toda la roca con propiedades y condiciones que se ven afectadas por las discontinuidades (Fig. 3).

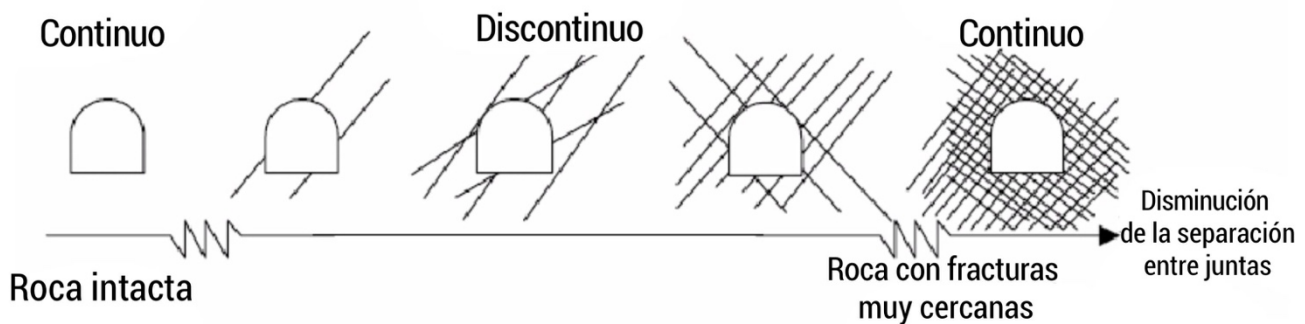


Figura 3.- Conforme a las discontinuidades presentes en el medio se puede determinar si el medio es continuo o discontinuo.³⁸

Por último; el desarrollo de técnicas analíticas o numéricas para evaluar cada uno de los posibles modos de respuesta del macizo rocoso requieren los detalles geológicos (como lo son cualquier discontinuidad presente en el macizo rocoso) que puedan inducir peligro en la excavación a corto o largo plazo, considerando la representatividad de las pruebas de campo y laboratorio en relación con la estructura del terreno y las dimensiones del proyecto.

³⁸ Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997



3.4 TIPOS DE COMPORTAMIENTO DEL TERRENO

Cuando hablamos del comportamiento del terreno nos referimos al terreno que se encuentra en las inmediaciones de una excavación donde se puede desarrollar una inestabilidad.

Los tipos de comportamientos comunes en los terrenos donde se desarrolla una excavación se pueden dividir en dos grupos de acuerdo con su capacidad deformable y su resistencia:

- a) Rígidos: asociados a movimientos de bloques de roca en discontinuidades (Imagen 11).
- b) Deformables: asociados a movimientos producidos por la interacción de los esfuerzos con la deformabilidad de los materiales; generalmente se presentan en suelos o rocas muy blandas si la excavación es de poca profundidad o bien en rocas duras a profundidades mucho mayores (imagen 12).



Imagen 11.- Talud con fracturas que dividen al macizo rocoso en bloques.³⁹

³⁹ Obtenida de: <http://www.biodiversidadvirtual.org/geologia/Diaclasas-en-los-conglomerados-de-Montserrat-img5907.html>

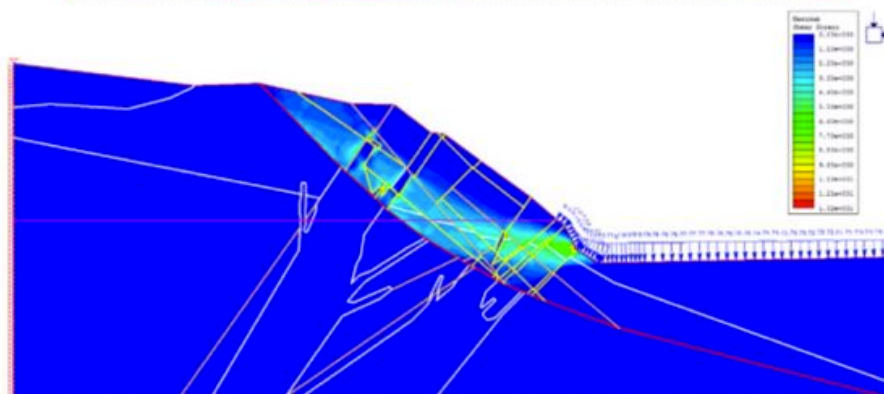
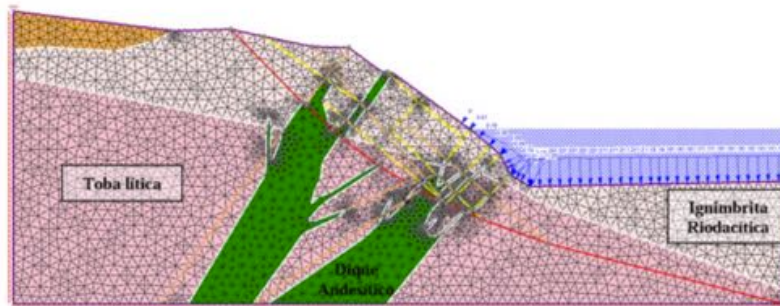
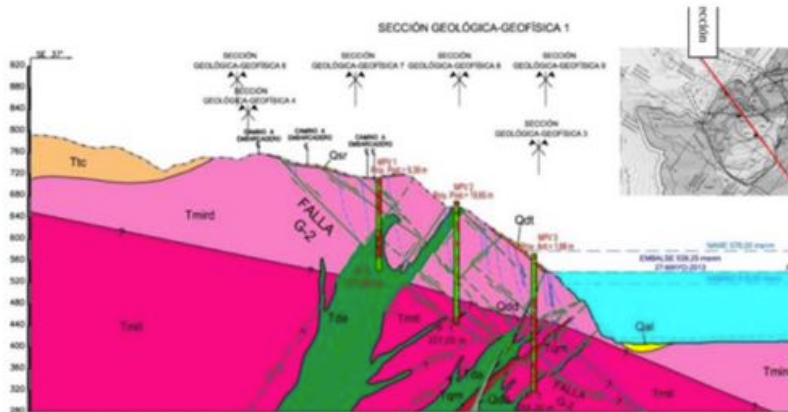
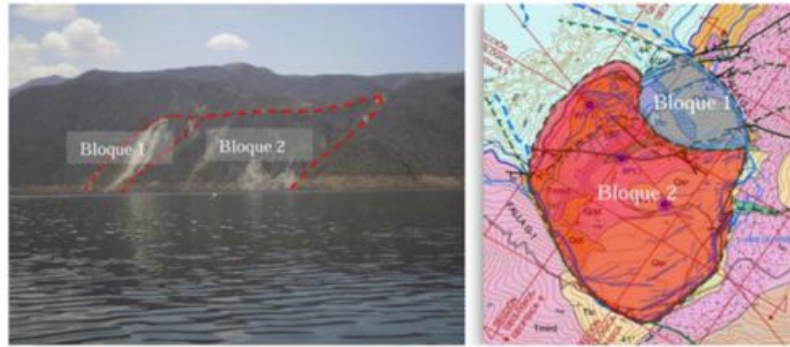


Imagen 12.- Análisis de estabilidad de embalse de una presa, en la primera imagen se puede ver claramente que hay una zona de riesgo, en la cual al agregarle una saturación de agua podría colapsar y poner en riesgo la población cercana, en la segunda imagen vemos la geología del lugar, posteriormente se hace la simulación numérica con un software de elementos finitos y se realiza un mallado con el cual se realizarán operaciones numéricas lo cual nos dará la representación del medio, en la última imagen se puede observar el resultado de las operaciones realizadas con el programa, donde se ve claramente el plano de falla. (Montiel, E 2016)



El comprender el comportamiento es el punto crucial para el ingeniero geotecnista, pues de ello dependerá la estimación de desencadenar una falla o no.

La “fallas” de las excavaciones a nivel geotécnico se traducen en roturas del terreno dadas dos probables condiciones:

- a) El desplazamiento de uno o un conjunto de bloques formados por la intersección de las discontinuidades geológicas
- b) El exceso de esfuerzos en ciertas zonas de la excavación, donde la rotura del terreno provoca la pérdida de sectores de la excavación.
- c) La combinación de los casos anteriores mediante coalescencia.⁴⁰

Por su parte la presencia y presión del agua es un efecto de carga importante, especialmente en condiciones de materiales heterogéneos. Las fallas causadas por el agua subterránea normalmente se asocian a la liberación de grandes cantidades de agua (caudales) en una excavación o bien la modificación del estado de esfuerzos por la presión en los poros (imagen 13a).

Las voladuras (comúnmente utilizadas en la minería) por su parte deberán de ser consideradas ya que también modifican el estado del terreno. El objetivo central de este proceso se basa en fragmentar la roca para poder utilizarla en la recuperación de materiales o bien para alojar un espacio o camino donde existirá tránsito. El realizar este proceso de manera descontrolada puede traer repercusiones primeramente en la seguridad del personal de la excavación o bien la integridad del proyecto (Imagen 13b).

Para tratar la influencia de las voladuras, Hoek (2012), propone dentro de su criterio el factor “D” (*damage*)⁴¹, el cual influye la condición del macizo rocoso afectando sus propiedades, permitiendo tener aproximaciones más realistas si el efecto de estas debe tomarse en cuenta.



Imagen 13 a) (izquierda).- Mina a cielo abierto con voladura mal hecha.⁴² b) (derecha).- Mina a cielo abierto con voladura bien hecha.⁴³

⁴⁰ Oyanguren P., Monge L., *Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*, 2004, 285p.

⁴¹ Hoek, E., *Blast Damage Factor D*, Technical note for RocNews, 2012.

⁴² Mina “Los Santos” Salamanca obtenida de <https://www.minesur.es/proyecto/11/mina-los-santos-salamanca>

⁴³ Mina de cobre Wyoming de Chuquicamata en Chile en 1984 http://www.wikiwand.com/pl/Kopalnia_odkrywkowa



IV.- GEOTECNIA E INGENIERÍA

La ingeniería es una parte esencial de nuestra vida, si se observa en cualquier parte y se mira alrededor se podrá ver todo aquello que es la ingeniería, es la invención, la creatividad es la capacidad de utilizar todas aquellas herramientas para crear o realizar obras tan comunes como la construcción de un edificio (Imagen 14), o tan monumentales como la realización de una presa, todo esto posible gracias a la combinación de las matemáticas, física y química así como otras ciencias de las que se apoya conforme a la especialidad de la misma y pueden servir tanto para el desarrollo de tecnología o en nuestro caso para el aprovechamiento al máximo de manera eficiente y productivo de los recursos o las fuerzas de la naturaleza para el beneficio de la sociedad.



Imagen 14.- Edificio principal de la facultad de Ingeniería en Ciudad Universitaria.

La ingeniería es la que transforma el conocimiento científico en algo utilizable en su interpretación de la naturaleza, ya que dicho conocimiento si se quedara como tal solo serviría para acrecentar nuestro acervo matemático, físico o químico. Al combinarlo con la ingeniería estos conocimientos se enfocan en la invención o el perfeccionamiento en métodos o tecnología de una manera pragmática y ágil, todo esto haciéndolo conforme a los requisitos de seguridad, presupuesto y eficiencia.

Los ingenieros tienen que manejar los problemas que se les presenten conforme a las leyes que rigen la naturaleza, las matemáticas y las leyes de la física. En la práctica de la ingeniería se cree que todo se puede representar mediante estos dos grandes grupos de ciencias, todo lo que existe u ocurre en el universo puede describirse con fórmulas matemáticas y números. Al paso del tiempo construimos



fórmulas que describen el funcionamiento de lo que vemos y a partir de ellas deducimos otras fórmulas y números correspondientes a otros objetos o sucesos.

En sí, aun sin conocer los procedimientos matemáticos o las matemáticas en sí, las utilizamos siempre inconscientemente, como al momento de calcular la fuerza o la velocidad con la que se debe de lanzar un objeto o al calcular la fuerza y velocidad con la que hay que saltar para llegar al lugar que se quiere, todo eso y más puede representarse mediante una ecuación. Todo lo que nos rodea tiene matemáticas implícitas como lo son los pétalos de las flores, la forma característica de un caracol o simplemente las proporciones de nuestro cuerpo, en sí las matemáticas están presentes siempre en nuestro día a día y en las leyes del universo, es por ello que se le toma en un nivel igual a la ciencia; siendo ambas partes del gran domino llamado conocimiento.

Ya vista la importancia de la ingeniería, así como las matemáticas que se utilizan en esta área es importante recalcar la definición de geotecnia, dado que es la razón de ser de este trabajo, “La geotecnia es la rama de la geología que trata de la aplicación de principios geológicos en la investigación de los materiales en la corteza terrestre implicados en el diseño de obras civiles, mineras, petroleras y nucleares. Es en pocas palabras el conocimiento preciso de las propiedades mecánicas del terreno que se pretende modificar ante la influencia que en ellos puedan generar las actividades humanas”⁴⁴, esta disciplina para poderse llevarse a cabo necesita de la mecánica de suelos, de la mecánica de rocas y de la geología aplicada como se vio anteriormente.

Para el desarrollo de un proyecto geotécnico es necesario primero tener una buena descripción geológica, posteriormente se requieren análisis de laboratorios para determinar parámetros geotécnicos, con esto se puede hacer una estimación de la respuesta y comportamiento del terreno, de ahí se hace una evaluación de riesgos y después de todos estos pasos que constituyen la parte conceptual, se realizan los análisis numéricos correspondientes para ver la estabilidad del proyecto y finalmente se realizan los procedimientos necesarios para llegar a la terminación del proyecto.

Como se citó anteriormente, la parte básica y fundamental de cualquier proyecto geotécnico, es el levantamiento geológico ya que todo parte de las condiciones del terreno, litología (Fig. 4) y estructural, en sí de las condiciones geológicas imperantes, así como saber de la escala a la que se trabajará.

⁴⁴ Definición obtenida del Servicio Geológico Mexicano (SGM)
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157802/Que-es-la-Geotecnia.pdf>

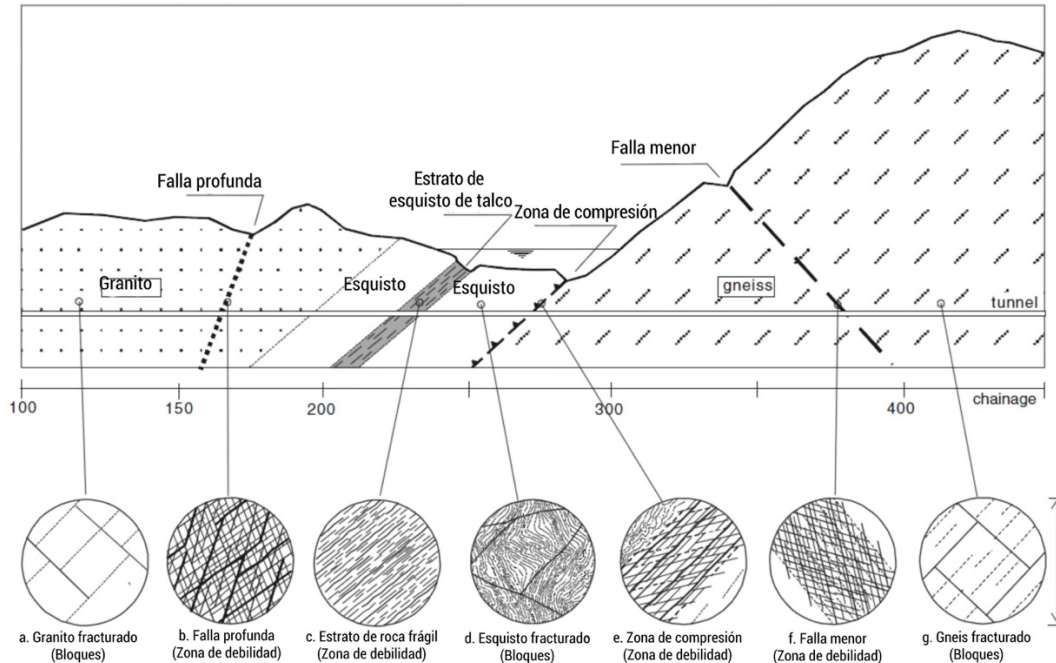


Figura 4.- Representa las diferentes litologías que se pueden encontrar en un proyecto geotécnico, y las cuales debemos considerar junto con la geología estructural que presenta cada una de ellas. (Hudson, 2003)

El geotecnista tiene que basar sus hipótesis con base en las descripciones y datos geológicos, puesto que es la conceptualización geológica la que aportará las características traducidas en fortalezas y/o debilidades del terreno que se está evaluando. Estas dos ramas se diferencian principalmente por su manera de sacar conclusiones, ya que la geología realiza sus evaluaciones desde un punto de vista cualitativo, a partir de observaciones y suposiciones de lo que aconteció en tiempos geológicos, en cambio la ingeniería se apalanca principalmente en el punto de vista cuantitativo, ya que en el uso de las matemáticas se establecen parámetros fehacientes como la evaluación de propiedades, análisis matemáticos, todo esto con la finalidad de predecir mediante estas herramientas el comportamiento del terreno y la influencia de las características geológicas del mismo, con diversas condiciones⁴⁵.

La conjunción de la conceptualización geológica y las características de los proyectos, verán su conexión e importancia en los trabajos de geotecnia, pues a través de la mecánica de sólidos deformables (rama de la física que trata de medios continuos que tienen una forma definida no determinada enteramente por el recipiente o conjunto de constricciones sobre la superficie del sólido) se resolverá la interacción del terreno con la geología, llevando a conclusiones y diseños que afectarán el comportamiento del conjunto, tomando las decisiones más adecuadas dependiendo de las respuestas previstas en su cálculo.

⁴⁵ Ulrich Smoltczyk, Geotechnical Engineering Handbook, 2002



La realización de los proyectos geotécnicos depende de los métodos numéricos y estos tuvieron su primera aparición con Newton, que fundamentó las ecuaciones necesarias para darle inicio a los métodos numéricos, que con el transcurso del tiempo y con ayuda de otros estudiosos del tema (Imagen 15) llegó a ser lo que conocemos hoy en día y nos ayuda a la solución de problemas relacionados a la geotecnia.



Newton



Hooke



Euler



Coulomb



Cauchy

Imagen 15.- Representantes que le dieron forma a los métodos numéricos tal y como los conocemos hoy en día. ⁴⁶

⁴⁶ Edgar Montiel, Clase de Geotecnia de Excavación, 2017.



V.- MACIZOS ROCOSOS Y SUELOS

En el desarrollo de proyectos geotécnicos se tiene que saber qué tipo de material se está manejando y dependiendo de si es una roca o un suelo se utilizan diferentes métodos. Primero más que nada es conocer las diferencias de estos materiales, para posteriormente poder realizar el análisis adecuado.

5.1 DIFERENCIAS BÁSICAS ENTRE MECÁNICA DE ROCAS Y DE SUELOS

Como se menciona al inicio de este capítulo es importante poder identificar adecuadamente el material en el cual será realizada la obra para conocer el comportamiento del mismo ya sea durante el cambio inducido en el terreno o después de éste. En la mayoría de los casos es un conjunto de la composición del macizo, el efecto del estado de esfuerzos, la forma y la geometría de excavación, el agua subterránea, y la influencia e instalación del soporte de la roca en una excavación, todo esto para tomar las debidas precauciones y así poder realizarla de manera eficiente y rápida. El identificar si el material es un suelo (Imagen 16) o un macizo rocoso (imagen 17) es muy importante, por ello a continuación se verán algunas de las diferencias.

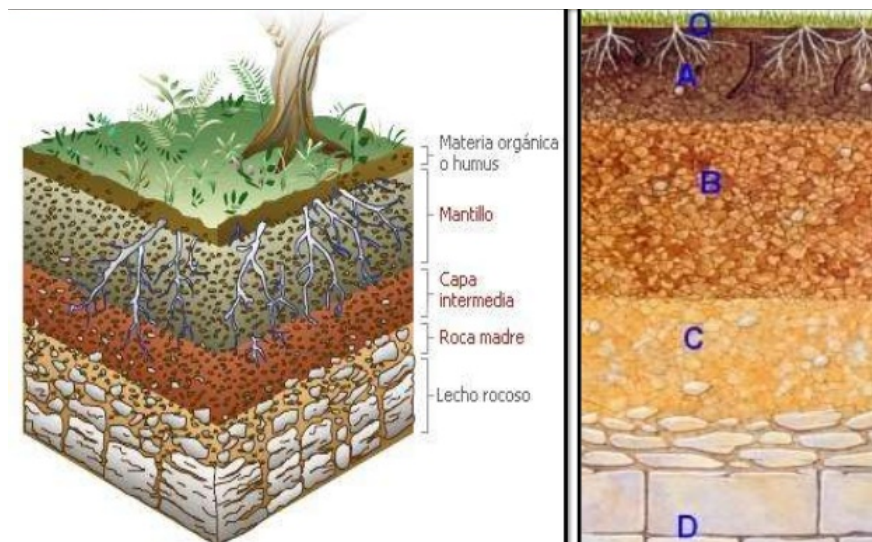


Imagen 16.- El suelo se compone de 3 a 4 capas, la capa A es aquella donde se encuentra la materia orgánica y donde se encuentra la vegetación.

Comúnmente es obscuro ya que tiene materia orgánica llamada humus, posteriormente se encuentra la zona B donde el contenido orgánico es menor y por eso mismo el color cambia y se vuelve más claro, en él se depositan materiales arrastrados de arriba; la zona C es la más cercana a la roca madre, está constituida por la parte más alta de la roca que al estar sometida a alteraciones físicas como químicas se encuentra fragmentado, pero todavía se pueden reconocer las características de la roca madre.⁴⁷

⁴⁷ Recuperada de: <http://miprofegrace.blogspot.mx/2015/11/horizontes-del-suelo.html>



Imagen 17.- Macizo rocoso, éste puede ser de diversas maneras, estratificado o masivo, al evaluar un macizo rocoso es importante poner singular atención a su calidad e igualmente a su estructura, así como la presencia de factores que afecten su calidad como lo son las fracturas, fallas o la presencia de agua.⁴⁸

- Los procesos de rotura de rocas intactas implican mecanismos de fracturación como generación y crecimiento de grietas en un medio pseudo-continuo, mientras que en suelos la rotura no afecta a la integridad mecánica de cada uno de los granos individuales.
- Los suelos, en las condiciones normales de operación, se suelen encontrar sometidos a campos de tensiones débiles, siendo lo contrario en las rocas.
- Las rocas suelen tener módulos elásticos manifiestamente mayores (cientos de veces) que los suelos y lo mismo sucede con la resistencia.
- El flujo de agua en rocas es conspicuo, esto es que se produce siguiendo fisuras o canales determinados, lo que suele originar niveles bajos de permeabilidad, mientras que en suelos el flujo se produce a través de los poros que deja el entramado de partículas sólidas.⁴⁹

Para una comprensión y diferenciación entre estas dos ramas se presenta la siguiente tabla (Tabla 1):

⁴⁸ Obtenida en <https://www.youtube.com/watch?v=HMDNxdTCFQ8>

⁴⁹ Para profundizar en estos temas se recomienda llevar previamente las materias de mecánica de suelos y mecánica de rocas, así como consultar textos como el Oyanguren con su libro *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*, y Hudson, *Engineering Rock Mechanics Part 1*.



Mecánica de Rocas	Mecánica de Suelos
Siempre es rígido.	La rigidez depende de su composición.
Anisótropo, depende de la dirección de las entradas.	Comúnmente isótropo a escala visible.
No necesita soporte, es masivo, sin la presencia de agua ya que el agua con el tiempo puede erosionar y dañar la calidad de la roca.	Se necesita un pequeño soporte, sin la ayuda de algún fluido la dureza es prácticamente nula, sin la presencia de líquidos no se tiene una consistencia para poder trabajar con fluidez (aunque los líquidos no deben de ser en exceso).
Muy difícil llegarlo a poner en estado inestable.	Con niveles bajos de esfuerzos puede alcanzar un estado inestable.
	* Existe la licuefacción.
Cuando está sometido a gran cantidad de esfuerzos se comporta comúnmente de manera frágil y hasta explosiva (Rockburst)	Con la presencia de pequeños esfuerzos se vuelve dúctil, se ajusta a casi cualquier situación extrema.
No existe consolidación.	Se consolida al presentar nuevas condiciones en el medio.
Bloques.	Continuo.
Presenta diferencias visibles.	Finito.
Difícil de caracterizar, solo se puede hacer una aproximación empírica.	Bastante determinista a la hora de caracterizarlo solo se necesita un poco de tiempo en el laboratorio o pruebas in situ.
Puede presentar cientos de kilómetros de profundidad.	Siempre es superficial.
Se presenta en bloques.	Continuo
Nunca acumula presión intersticial.	Presenta presión intersticial.
Se formaron desde hace millones de años.	Es relativamente reciente.
Se necesita grandes esfuerzos para llegar a romperlo.	Puedes disgregarlo con los dedos.
Es necesario el uso de explosivos para penetrarlo.	Se puede penetrar con cualquier cosa.
Existe dilatancia	La dilatancia no es un gran problema
La presencia de agua solo es importante cuando existen demasiadas discontinuidades interconectadas.	La presencia de agua determina su resistencia
Su clasificación depende del número de discontinuidades presentes.	Su clasificación depende de si está drenado o no.

Tabla 1.- Diferencias básicas de mecánica de rocas y mecánica de suelos (recuperado de Oyanguren 2004, y Hudson 2004)

VI.-APLICACIONES DE LA GEOTECNIA EN LA INGENIERÍA

A continuación, se hablará sobre algunas de las interacciones que tiene la geotecnia en distintas áreas de la ingeniería. Se debe decir que estos serán abordados desde el punto de vista de comportamiento del terreno ante el efecto de la excavación.

6.1 MINERÍA

6.1.1 MINERÍA A CIELO ABIERTO

En la minería a cielo abierto (Imagen 18) la geotecnia cobra importancia al estudiar la respuesta de la excavación en materiales que normalmente han sido afectados por fenómenos de intemperismo y/o erosivos. Estas excavaciones superficiales pueden presentar complicaciones debido al clima de la zona donde se desarrollen.

En estas obras es la estabilidad de los taludes el tema recurrente en la geotecnia. Para definir la estabilidad se deberá de reconocer lo siguiente:

- Geometría de yacimiento.
- Infraestructura de la cantera.
- La calidad de los materiales geológicos donde se encuentra el yacimiento
- El agua subterránea por sus efectos en los esfuerzos o en la generación de caudales que pueden afectar el proceso de excavación
- La influencia de la voladura

Como puntos importantes en la estabilidad de taludes se busca disminuir el nivel freático ya sea con túneles de drenaje, sondeos horizontales o pozos verticales de drenaje, puesto que la presencia del agua puede ocasionar una reacción en cadena haciendo que la resistencia del material decaiga y pueda incurrir en un derrumbe.

Igualmente es necesario evaluar si requiere elementos de sostenimiento, si es que sí fueran necesarios, se tiene que planear qué tipo de sostenimiento sería el adecuado para el terreno en que se encuentra la obra, entre los cuales se encuentran los pernos de anclaje, cables, contrafuertes de escolleras y muros de contención.



Imagen 18.- Mina a cielo abierto Kimberley.⁵⁰

6.1.2 MINERÍA SUBTERRÁNEA

Por otro lado, cuando hablamos de la minería subterránea (Imagen 19) se tiene que tener en claro el tipo de obra que se va a desarrollar puesto que en la minería hay obras que son temporales y otras que necesitan ser de mayor duración, por lo tanto el geotecnista tiene que ser capaz de analizar la estabilidad y así poder realizar un diseño conforme a los requerimientos de cada obra, aquí como se maneja una excavación es imperativo darle la estabilidad necesaria para no tener ningún evento crítico.

Independientemente del método de explotación, es importante que el geotecnista tome en cuenta los siguientes requerimientos:

- Asegurar la estabilidad general de la mina, entendiéndose como tal la masa de mineral y los huecos explotados, el resto del mineral y la roca de caja adyacente.
- Proteger las principales excavaciones de servicio a lo largo de su vida operativa.
- Ofrecer acceso sencillo a los lugares de trabajo en el entorno de los tajos.
- Preservar la condición para extraer las reservas no explotadas.

⁵⁰ Edgar Montiel, Clase de Geotécnica de Excavación, 2017



Imagen 19 .-Mina Mimosa, la segunda mina subterránea de hierro en operar en el estado de Coahuila.⁵¹

6.2 INGENIERÍA CIVIL

En la ingeniería civil es de vital importancia mantener la integridad de la excavación que se está realizando puesto que comúnmente es para almacenar maquinaria importante o el paso y vivienda de gente como es en los túneles carreteros (Imagen 20) o alguna instalación subterránea.

El objetivo de un ingeniero civil es ocupar el espacio creado, por lo tanto, es necesario comprender la geometría de la masa de roca, así como sus propiedades para poder tomar las decisiones adecuadas para cada tipo de terreno.

Unas de las excavaciones subterráneas más comunes para la ingeniería civil son:

- Estabilidad de taludes
- Diseño y ejecución de túneles carreteros
- Cavernas con distintos usos
- Diseño de cimentaciones para grandes obras.

⁵¹ Obtenida de: <http://www.infonor.com.mx/index.php/centro/8-centro/59615-opera-minosa-segunda-mina-subterranea-de-ferro-en-hercules>



Imagen 20.- Túnel carretero de Colombia.⁵²

6.3 PETRÓLEO

En esta área el ingeniero desea predecir la estabilidad de los pozos petroleros (Imagen 21) y en qué condiciones es posible que ocurra un desprendimiento en las paredes del pozo, que es causado por los altos esfuerzos a los que las paredes están sometidas.

Una aplicación de la geotecnia (geomecánica profunda) igualmente importante en la industria de los hidrocarburos es la que se refiere al manejo adecuado de presiones para no sobrepasar la presión de ruptura de la roca sello con la finalidad de garantizar la hermeticidad del yacimiento.

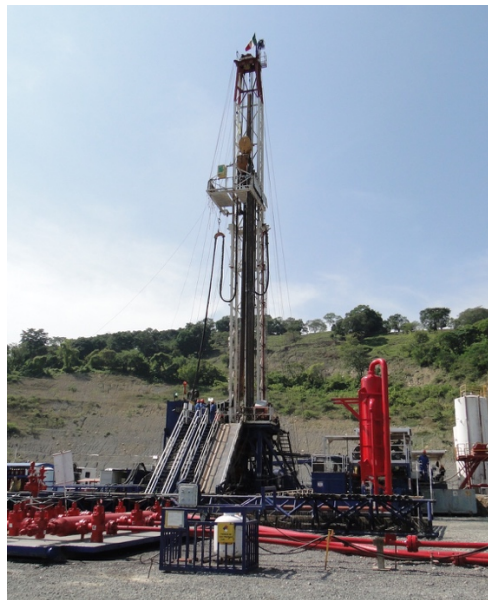


Imagen 21.- Pozo petrolero en Poza Rica.⁵³

⁵²Obtenida de:

https://www.construdata.com/Bc/Construccion/Noticias/se_promueve_la_construccion_de_tuneles_en_colombia.asp

⁵³ Recuperada de: <http://www.noreste.net/noticia/empresarios-claman-contratos-petroleros/>



6.4 RESIDUOS NUCLEARES

La geotecnia y las excavaciones también se ocupan para crear espacios donde almacenar sustancias (Imagen 22), en este caso nucleares, para esto se requiere de realizar una evaluación minuciosa ya que no se debe permitir que haya algún error o fuga, ya que como es un material altamente tóxico se tienen que tomar las precauciones debidas.



Imagen 23.- Método novedoso de almacenamiento de residuos nucleares.⁵⁴

⁵⁴ Recuperada de: <https://joshuasaucedo.wordpress.com/2016/04/29/centrales-nucleares-y-energia/>



VII.- EL PROCESO DE EXCAVACIÓN

En el libro de Hudson explican en el capítulo 15 el proceso de una excavación y mencionan que, básicamente una excavación es la remoción de material dentro de una masa rocosa, lo que resulta en una abertura cuya geometría puede estar determinada por criterios operacionales.

Los motivos por los cuales se requiere hacer una excavación son dos, la primera para crear una abertura y la segunda para utilizar el material extraído. Un ejemplo del primer caso básicamente es cuando se realizan los túneles de acceso mineros, estos comúnmente son temporales, pero se realiza una excavación para tener acceso a la zona mineralizada de interés, o en obras civiles, como lo serían una casa de máquinas o un pozo petrolero, estas excavaciones son más que nada permanentes, pero en sí el objetivo es entender que lo que se requiere es el espacio que deja la excavación. En el segundo caso es cuando el material tiene un valor económico y por ello se excava para poder extraer el material valioso de la roca, y para ello hay que someterlo a varios procesos físicos y químicos para su extracción.

Hay diferentes consideraciones sobre el diseño entre una obra civil y una minera, esto es debido a la consideración de la vida operativa de las mismas. Es bien sabido que una obra civil tiene que ser en sí permanente, hablando de tiempo humano, que sería aproximadamente 100 años, en cambio una obra minera solo tiene que existir en el transcurso de la explotación del mineral, ni más ni menos.

Al eliminar parte de un macizo rocoso es necesario tomar en cuenta varios aspectos del macizo rocoso como serían las fracturas del medio, y ciertos criterios por analizar que son importantes al realizar una excavación que son:

- ▶ Haber pasado la porción post pico de la gráfica esfuerzo-deformación para estar en un sistema relativamente estable
- ▶ La distribución de bloques se debe cambiar a distribución y tamaño de fragmentos
- ▶ Y porque medios debe introducirse la energía requerida en la roca.

Como se explicó anteriormente, es necesario hacer varias evaluaciones a la hora de efectuar una excavación, y por ello es importante realizar un buen estudio geológico y geotécnico, independientemente si la obra a llevar a cabo es temporal o permanente, ya que tienen que cumplir con las normativas de seguridad.

VIII.- EXCAVACIONES SUPERFICIALES

Las excavaciones superficiales son todas aquellas que se encuentran sobre la superficie de la corteza terrestre, eso quiere decir que se encuentran a merced del medio ambiente por lo tanto se tiene que tomar en cuenta varios aspectos, como lo es el tipo de roca o suelo, su saturación de agua y el tipo de clima en donde se encuentra la obra a realizar para tener un factor de seguridad aceptable.

Para poder mantener estable un talud es necesario analizarlo y mediante sus características, prever el tipo de falla que podría presentarse. Esto se realiza mediante el conocimiento de la roca en la que se trabaja, ya que podría ser continúa dado que el tipo de fracturas que se encuentran en ella son demasiadas y por lo tanto llega a parecerse a un suelo, lo que se les conoce como CHILE (Figura 5a) o discontinua ya que las fracturas que se encuentran en el medio dejan salida al bloque en cuestión, no son muchas, pero si las suficientes que como para que al momento de cruzarse generen un bloque libre. A estas se les conoce como DIANE (Figura 5b) y existen varios mecanismos de falla para cada uno de estos.

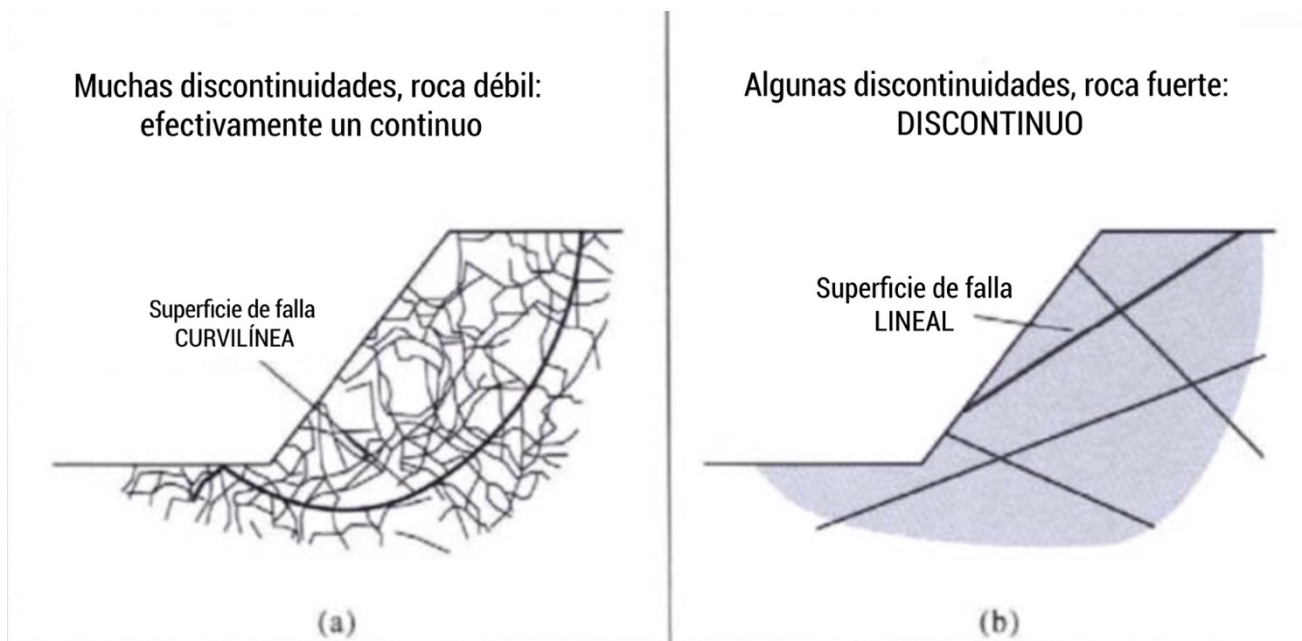


Figura 5.- Se puede ver que tenemos dos medios con distintas características, el inciso a) es un macizo rocoso con muchas fracturas, podría tomarse como si fuese un medio discontinuo pero la cantidad de fracturas que tiene son tantas que lo correcto sería clasificarla como un continuo (CHILE) y la falla que posiblemente presentará es circular, como si fuese un suelo; en el inciso b) se encuentra un macizo rocoso el cual tiene dos familias de fracturas por lo tanto se considera un medio discontinuo (DIANE), y dado que una de las fracturas se encuentra buzando hacia donde se encuentra el talud, el mecanismo de falla que es más probable encontrar sería el de falla lineal (Hudson. 2004).

Los mecanismos de falla básicos son el circular, lineal, el de cuña y el toppling, estos se nombraron conforme a la geometría en la que fallaban.

La falla circular, Fig. 6(a), se llama así ya que el modo en el que falla es parecida a una circunferencia, lo que pasaría si se tratara de un suelo, dado que las discontinuidades que presenta son tantas que



efectivamente se desliza con la forma de un círculo y se maneja como un medio continuo, en cambio las fallas lineales, Fig. 6(b), en cuña, Fig. 6(c), y toppling o volcadura nos damos cuenta que están dominadas por discontinuidades con la cual al existir una grieta de tensión se deslizan en un plano y el toppling se resquebraja formando bloques Fig. 6(d).

La falla plana, como lo indica su nombre se desliza en un plano de discontinuidad, ya sea creado inicialmente como podría ser la dirección de los estratos o por un plano de falla. La Falla en cuña es la combinación de dos discontinuidades que se intersectan. El toppling es aquella que tiene dos familias de discontinuidades que tengan fallas consecutivas, para formar bloques los cuales con el tiempo se vuelven inestables.

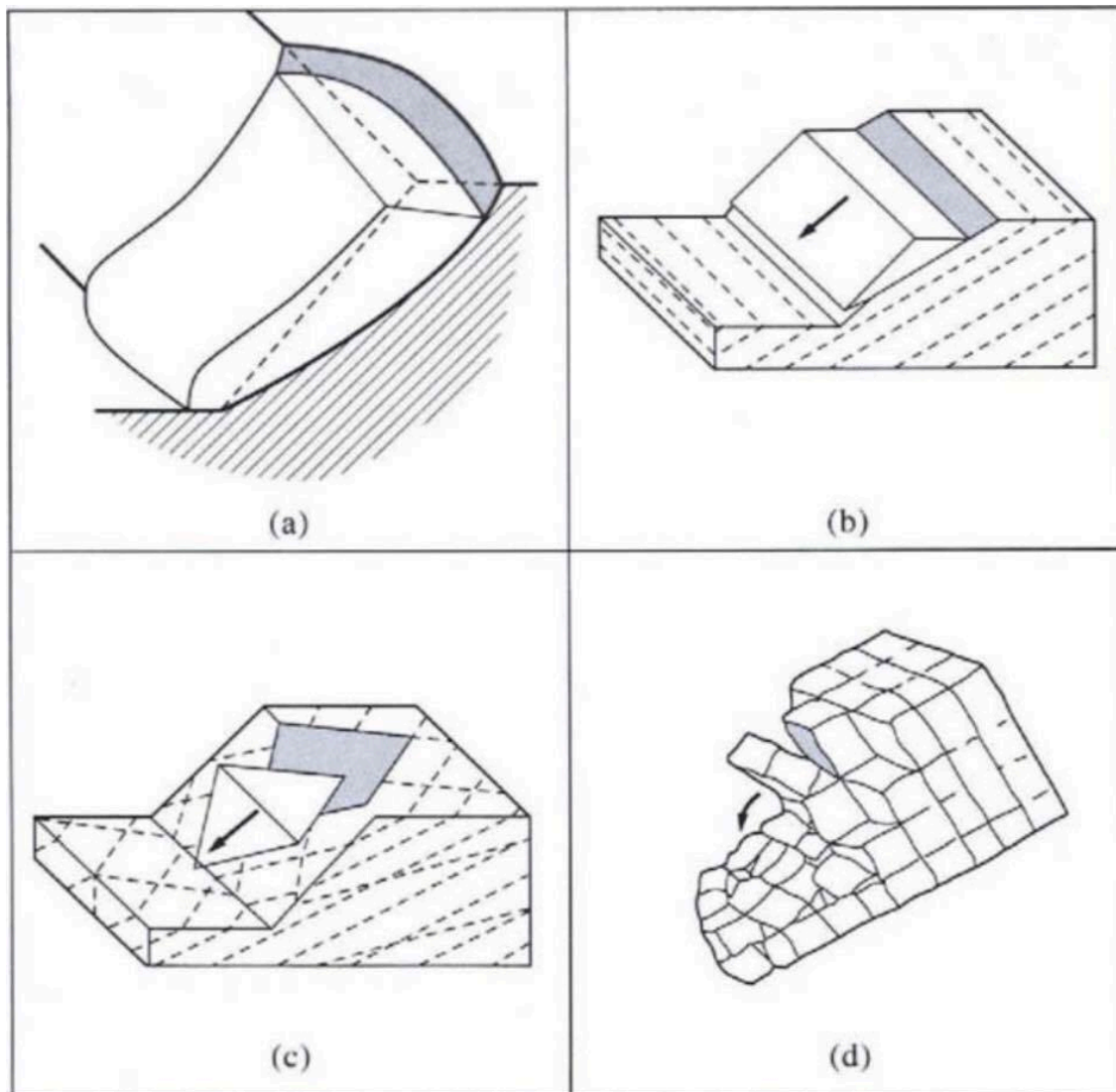


Figura 6.- Representación de los mecanismos de falla que podemos encontrar cuando realizamos alguna modificación al entorno. Falla Circular (a), Falla Lineal (b). Falla en cuña (c) y Toppling o Volcadura (Hudson,2004).

Conforme a lo anteriormente, visto al momento de realizar cualquier modificación al macizo rocoso se requiere de un análisis exhaustivo de la geología presente, para prevenir cualquier anomalía.



Dentro de las estructuras que se llegan a analizar en la geotecnia existen las creadas por el hombre y las creadas mediante los procesos naturales. A continuación, se mencionarán ambas, empezando por las pendientes naturales que se encuentran en la tierra.

Laderas

Las laderas son aquellas elevaciones que son hechas por la naturaleza en la que el hombre no tiene injerencia y se encuentran en cerros, montañas, volcanes, etc. (Imagen 23).



Imagen 23.- Ladera Natural, vista del norte del cráter del volcán Ranu Raraku de la Isla de Pascua.⁵⁵

A continuación, se mencionan los tipos de excavaciones superficiales que se analizan en la geotecnia de excavación que han sido creadas por el hombre:

Talud

Los taludes se consideran artificiales dado que son antrópicas esto quiere decir que son hechos por el hombre como lo serían los cortes y tajos (Imagen 24 y 25).

El talud es en sí cualquier superficie inclinada con respecto a una horizontal, estas estructuras son algo complicadas de analizar debido a que convergen problemas de mecánica de rocas y de suelos, así como obviamente la geología, se necesitan estas tres para la formulación de cualquier criterio.

En las obras creadas por el hombre se necesita generar una estabilidad de los taludes dado que un mal cálculo de estos puede ocasionar el fracaso de la obra, por lo tanto, condicionan el seguimiento del proyecto.

⁵⁵ Recuperada de: http://www.literaberinto.com/FORUM/forum_posts.asp?TID=4987&PN=2&TPN=2



En la estabilidad de las excavaciones superficiales se debe considerar la condición del terreno, su geometría (si es un terreno plano o una ladera), sus propiedades y la influencia ambiental a la que están expuestos.



Imagen 24.- Estabilización de corte carretero.⁵⁶



Imagen 25.- Mina a cielo abierto de Concordia, Sinaloa. (explotación de oro y fierro).⁵⁷

Existen grandes diferencias al momento de evaluar una excavación ya que esto depende del motivo por el cual se modifica el medio, en si una excavación en los diferentes ámbitos de la ingeniería significa cortar roca.

⁵⁶ Recuperada de <http://www.panoramio.com/photo/118326141>

⁵⁷ Recuperada de <http://old.nvnoticias.com/oaxaca/general/ambientales/239203-derraman-10-mil-800-toneladas-desechos-mina-dos-senores>



Si es para un proyecto civil se requiere sacar el escombro, desviar el agua presente y maquinaria industrial dado que se crea la modificación para el uso del espacio, por otro lado, en una excavación minera se corta conforme al aprovechamiento del mineral que se está extrayendo.

Para remarcar dicha diferencia se presenta la imagen 26 donde se puede ver claramente un corte carretero en la cual se le ha dado un tratamiento específico como lo es el concreto reforzado de 1 m^2 combinado con anclas de tensión, está totalmente cubierto con hormigón proyectado lo cual prevé el desgaste y tensión de las anclas, igualmente posee un sistema de drenaje del agua. Este soporte está diseñado para tener estabilidad en el corte y minimizar los caídos de roca lo cual podría afectar la carretera.



Imagen 26.- Ejemplo de taludes en roca en Hong Kong soportada con anclas de tensión concreto reforzado y hormigón lanzado (Rock Slope Engineering, Hoek y Brown 2004).⁵⁸

⁵⁸ Obtenida de: <https://www.slideshare.net/aquarius123/rock-slope-stability-analysis-lec-1>



Por otra parte, está el tipo de excavación minera, ésta se basa como se menciona anteriormente conforme a la mineralización, como la mina de Palabora (Imagen 27) a cielo abierto en Sudáfrica con una extensión de 830 m de profundidad y con taludes de 45-50° convirtiéndose en una de las minas más profundas y empinadas del mundo⁵⁹.



Imagen 27.- Mina Palabora a cielo abierto en Sudáfrica.⁶⁰

Los factores que influyen en la estabilidad de la roca dependen básicamente del contenido de agua, en que zona tectónica se encuentre el talud e igualmente el tipo de roca que se está manipulando. Los requerimientos de estabilidad dependen del proyecto a realizar y los manuales que los delimiten. Si se hace un puente con alta afluencia se requiere una construcción duradera e igualmente con sistemas que permitan soportar la estructura dado que el factor de seguridad es de vital importancia, y aun así su vida útil es de 10-30 años, esto dependiendo del clima y del mantenimiento que se realice

⁵⁹"Palabora Mining Company". Palabora Mining Company. 2005. Retrieved 14 April 2009.

⁶⁰ Obtenida de: <http://www.edelweissminerals.com/Pages/About.html>



periódicamente. Un contraste total a lo anterior visto son las obras mientras que usualmente se asignan con un factor de seguridad de 1.2-1.4 y es aceptable que haya posibles derrumbes, de hecho, un diseño óptimo de taludes es aquel que falla después de finalizar operaciones.

En una excavación para una mina el hecho de que haya un deslizamiento no es de mucha importancia, siempre y cuando su magnitud sea algo manejable, si es un deslizamiento demasiado grande podría en riesgo tanto la vida del personal como el proyecto minero, si es un deslizamiento manejable y detectado no tiene consecuencias graves para el proyecto (Imagen 28), de hecho, se realiza la excavación para que sea temporal, en cambio en una obra civil tiene un alto grado de fiabilidad requerido ya que un deslizamiento o caída de rocas rara vez se puede tolerar⁶¹.



Imagen 28.-El impresionante deslizamiento de tierras de la mina de cobre de Bingham Canyon.⁶²

⁶¹ Wyllie C. D., Mah W. C., Rock Slope Engineering, 2004.

⁶² Recuperada de: <http://enriquemontalar.com/el-impresionante-deslizamiento-de-tierras-de-la-mina-de-cobre-de-bingham-canyon/>



IX.- EXCAVACIONES SUBTERRANEAS

Las excavaciones subterráneas son aquellas que se encuentran en el subsuelo, ejemplo de éstas son las minas subterráneas (Imagen 29), túneles carreteros (Imagen 30), socavones (Imagen 31), las cavernas para almacenar la sala de máquinas de una presa (Imagen 32), etc.

El comportamiento del terreno influye en demasía en este tipo de excavaciones, ya que al ser sometido a cambios en su configuración original se tiene que tener mucha precaución a la hora de manipularlo, tanto por los esfuerzos que interactúan en la obra como por las características geológicas que se presentan en la zona.

Hay diversos tipos de comportamiento (Figura 7), se dividen en plásticos y elásticos, esto depende principalmente de la calidad de la roca y los esfuerzos presentes, a continuación, se dará una descripción breve de cada uno de ellos:

- Estable: es cuando tenemos una roca de muy buena calidad con esfuerzos bajos.
- Cuñas Inestables: es cuando al momento de hacer una excavación quedan bloques con posibilidad de caerse ya sea por el daño a la hora de hacer la excavación o por las fracturas conjugadas que se encuentran en el lugar, se trata de una combinación de una roca de mediana calidad y se encuentra en una zona con pocos esfuerzos, en la presencia de estas condiciones la cuña no puede sostenerse por sí sola, así que se tiene que utilizar algún tipo de soporte.
- Caving: mejor conocido como “graneo” y esto sucede cuando en un macizo de pésima calidad incluso con pocos esfuerzos, por lo tanto, el techo puede irse “desmoronando” y puede llegar a colapsar, esto sucede porque las fracturas que tiene son muchas y los esfuerzos que hay en la zona no son suficientes para poder sostenerlo, cuando esto sucede es necesario poner un recubrimiento y hacer los cálculos necesarios para que el túnel que estamos supervisando no se venga abajo.
- Rockburst: este fenómeno ocurre cuando la calidad de nuestra roca es muy buena pero los esfuerzos presentes son muy grandes por lo tanto llega un momento en el que conforme avanza la excavación, la roca explota, ya que al modificar el medio los esfuerzos se van acumulando en la parte delantera de la excavación, hasta que la roca no soporta el cumulo de esfuerzos y cede.
- Squeezing: tiene dos características, roca de mala calidad y grandes esfuerzos presentes en la zona lo que ocasiona que haya deformación en forma de aplastamiento en la zona de excavación y por lo tanto se reduzca el radio del túnel, puesto que los esfuerzos son intensos. En esa zona es necesario poner un buen recubrimiento para que los esfuerzos no hagan que nuestra excavación ceda.

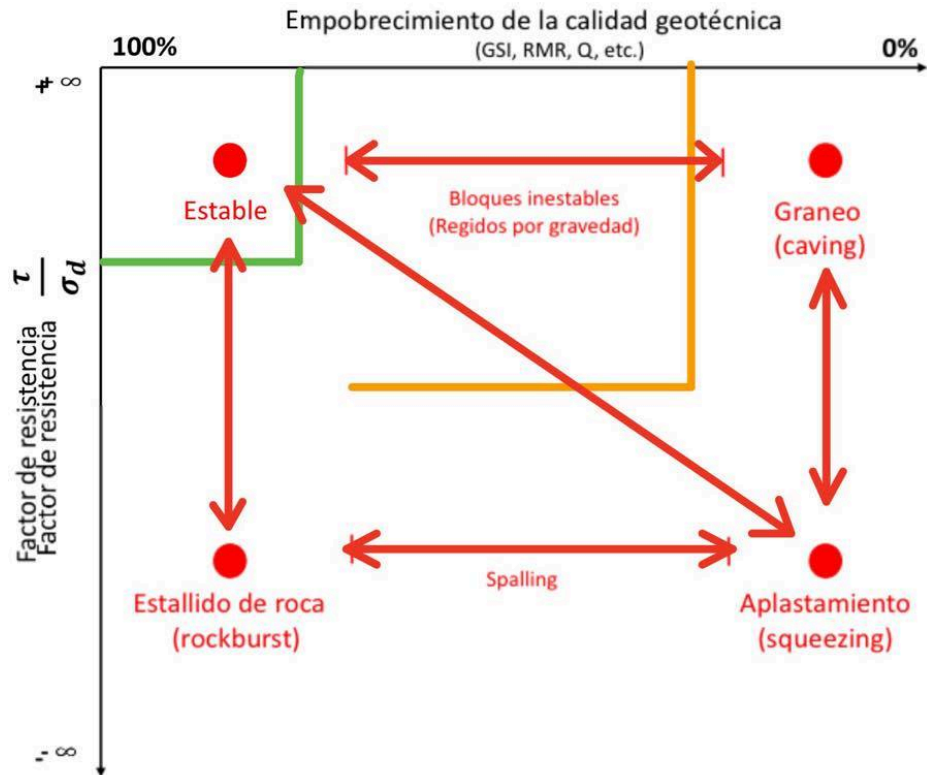


Figura 7.- Gráfico sobre el comportamiento del terreno en una excavación subterránea G. Russo, 2008.



Imagen 29.- Túnel carretero peruano.⁶³

⁶³ Recuperada de: <http://infraestructuraperuana.blogspot.mx/2017/>



Imagen 30.- Mina subterránea.⁶⁴



Imagen 31.- Socavón de Santa Lucía.⁶⁵

⁶⁴ Recuperada de: <http://www.apriso.com/blog/2015/05/modern-mining-is-transitioning-to-support-manufacturings-need-for-new-materials/>

⁶⁵ Recuperada de: <https://mti-minas-andalucia.blogspot.mx/2010/07/mina-lujar-socavon-san-luis.html>



Imagen 32.- Caverna de máquinas de la Central de Angostura Chile.⁶⁶

Para Hoek⁶⁷ las excavaciones subterráneas se dividen en dos: las “permanentes” y las provisionales, dado que hay excavaciones en la minería que son para que duren en si un tiempo relativamente corto, en cambio conforme a los cambios que ha habido conforme a la accesibilidad a los recursos se fue cambiando el tiempo de duración inclusive en las excavaciones mineras, donde requerían hacer cortes con una duración mayor a las cuales le empezaron llamando *permanentes* ya que los sistemas de tiro con sus malacates, ductos de mineral cámaras de bombeo y estaciones de quebradoras deberían estar en funcionamiento durante varias decenas de años, lo cual es mucho para este tipo de obras. En cambio, los ingenieros civiles raramente ocupan la obra provisional ya que los túneles, las casas de máquinas y subterráneas y las cavernas para el almacenamiento de petróleo o gas tienen que mantenerse estables por más de 20 años y en estos no se puede admitir inestabilidad alguna y para ello los recursos que se emplean son importantes.

⁶⁶ Obtenida de: <https://centralangostura.cl/videos/>

⁶⁷ Hoek E., Brown E., 1983.



X.- CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA⁶⁸

La caracterización de un macizo rocoso es un paso importante en el desarrollo de un proyecto puesto que con los datos recabados es con lo que se realiza el análisis de estabilidad para establecer un factor de seguridad aceptable.

10.1 IDENTIFICANDO LAS RESPUESTAS DEL TERRENO

La llamada *caracterización geotécnica* constituye un proceso de estudio del terreno en donde se determinan aquellas propiedades (*principalmente físicas*) del terreno con su consecuente asignación de valores dependientes del criterio geotécnico que se utilice.

El objetivo de la caracterización determina el *posible comportamiento del terreno* (macizos rocosos, suelos, saprolitos, etc.) tomando en cuenta las variables que pueden influir en su respuesta, incluyendo las modificaciones que generan en él un proyecto de ingeniería.

Palmstrom⁶⁹ (2010) desarrolla el siguiente cuadro (Fig. 8) en donde integra lo referente a la caracterización, en él explica la principal interacción entre el comportamiento del terreno y su caracterización geotécnica.

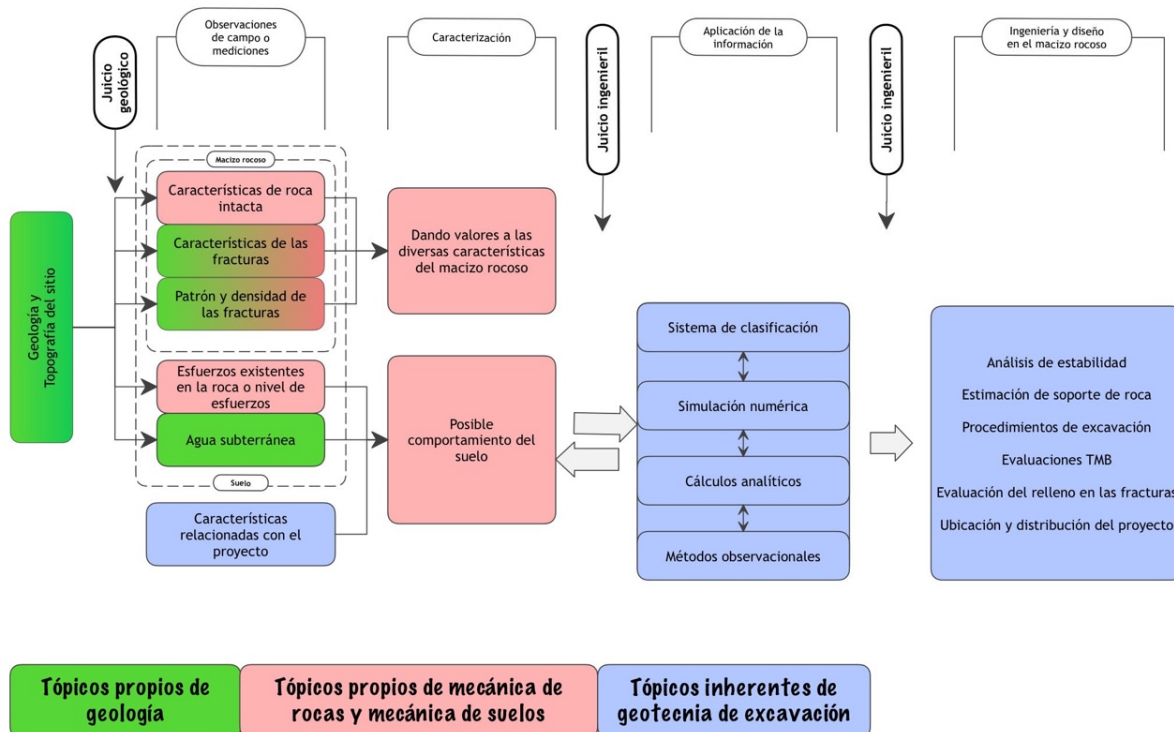


Figura 8.- Representación de la interacción entre la geología, la mecánica de rocas y suelos y el proceso de excavación obtenida de Palmstöm (2010).

⁶⁸ La mayoría de este Capítulo se ha obtenido de Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁶⁹ Palmström A., Hakan S., 2010.



En la geotecnia, la caracterización inicia con la identificación de las unidades litológicas y el arreglo geológico del terreno. En esta parte desarrollada por la geología, el geotecnista deberá de conocer el contexto general del sitio donde se esté estudiando, identificando las variables que pueden responder a las modificaciones que los proyectos impliquen al equilibrio tensorial de la zona.

Posteriormente, se deberá de integrar la hidrogeología de la zona y el estado de esfuerzos que existe en el sitio si es que estas variables son de importancia.

En términos geotécnicos, las unidades litológicas identificadas o bien la estratigrafía deberá de ser clasificada con los criterios desarrollados por la geotecnia en cada condición, siendo los suelos y los macizos rocosos, las principales clasificaciones.

10.2 CLASIFICACION DE SUELOS

Los suelos en geotecnia son clasificados mediante el marco dado por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el cual fue desarrollado por el Dr. Arthur Casagrande en 1948. El sistema se basa en el tamaño y gradación de las partículas al igual que en sus características de plasticidad.

10.2.1 TAMAÑO

En general, el SUCS solo incluye a los materiales con tamaño máximo menor que 75 mm.

El SUCS divide en dos grandes clases a los suelos en función del tamaño de grano: los suelos de grano grueso (suelos gruesos), cuyos granos son mayores que el tamaño de malla No. 200 (0,074 mm); mientras que los suelos de grano fino (suelos finos), son aquellos cuyos granos son menores que ese tamaño, a su vez los suelos gruesos son divididos en: gravas y arenas (Fig. 9).

En el caso de los suelos finos, no se clasifican con base en su tamaño de grano si no en su comportamiento (características de plasticidad). Los suelos finos son limos o arcillas.

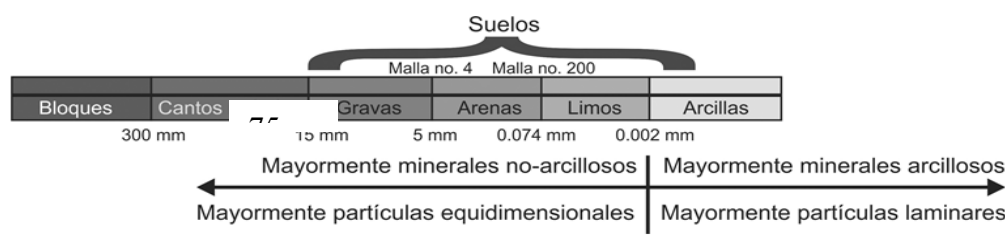


Figura 9.- División en la clasificación de suelos dependiendo del tamaño de grano.

10.2.2 GRADACIÓN

La gradación de un suelo establece la distribución de tamaño de sus partículas. Para un suelo grueso la distribución se obtiene mediante cribado por mallas, mientras que para suelos finos se obtiene con pruebas de hidrómetro.



El SUCS permite la clasificación de los suelos tanto en campo como en laboratorio, esta clasificación utiliza símbolos de grupo, con los cuales se denota el tipo de suelo con el prefijo y el sufijo señala sus propiedades, en la siguiente tabla (Tabla 2) se muestran dichos símbolos y su significado:

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Pobrementemente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (LL>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo (LL<50)	H

Tabla 2.- Símbolos utilizados en la clasificación SUCS.⁷⁰

Utilizando estos símbolos se pueden obtener diversas combinaciones que se encuentran en la naturaleza, definiendo así las características de cada suelo (Tabla 3):

SÍMBOLO	Características generales		
GW	GRAVAS (>50% en tamiz #4)	Limpias (Finos < 5%)	Bien graduadas
GP			Pobrementemente graduadas
GM		Con finos (Finos > 12%)	Componente limoso
GC			Componente arcilloso
SW	ARENAS (<50% en tamiz #4)	Limpias (Finos < 5%)	Bien graduadas
SP			Pobrementemente graduadas
SM		Con finos (Finos > 12%)	Componente limoso
SC			Componente arcilloso
ML	LIMOS	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	SUELOS ORGÁNICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

Tabla 3.- Tipología de suelos según SUCS.⁷¹

⁷⁰ B. Blazquez, Manual de Carreteras, 2016

https://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf

⁷¹ B. Blazquez, Manual de Carreteras, 2016

https://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf

Diagrama SUCS para clasificación de suelos gruesos (Fig. 10).

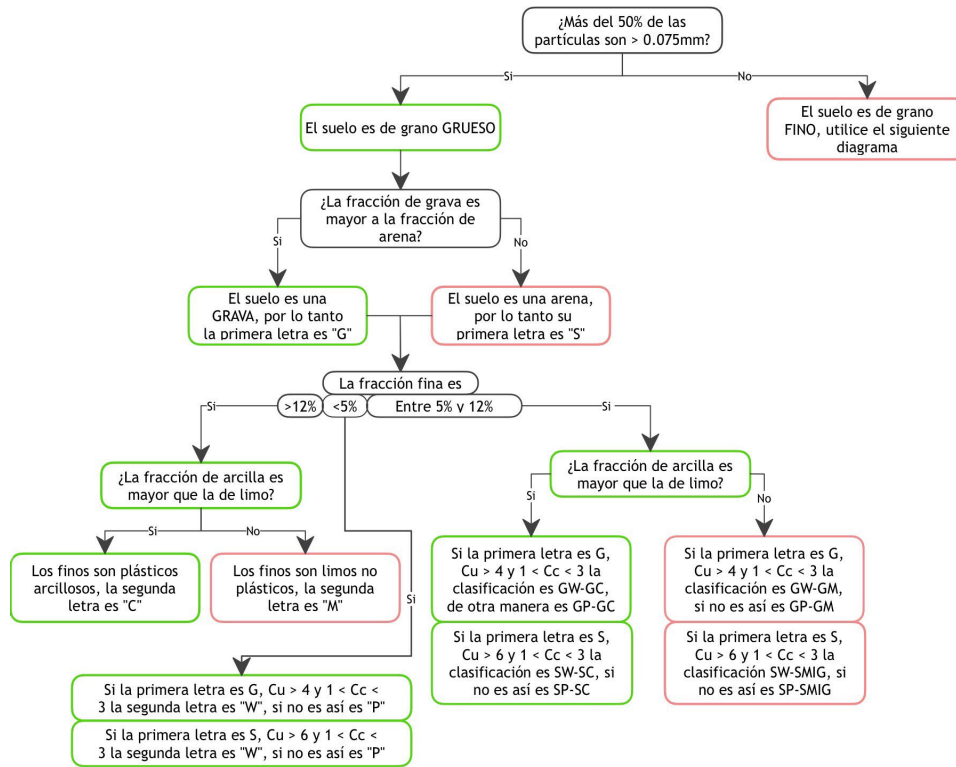


Figura 10.-Clasificación de suelos de grano grueso.

Diagrama SUCS para clasificación de suelos finos (Fig. 11).

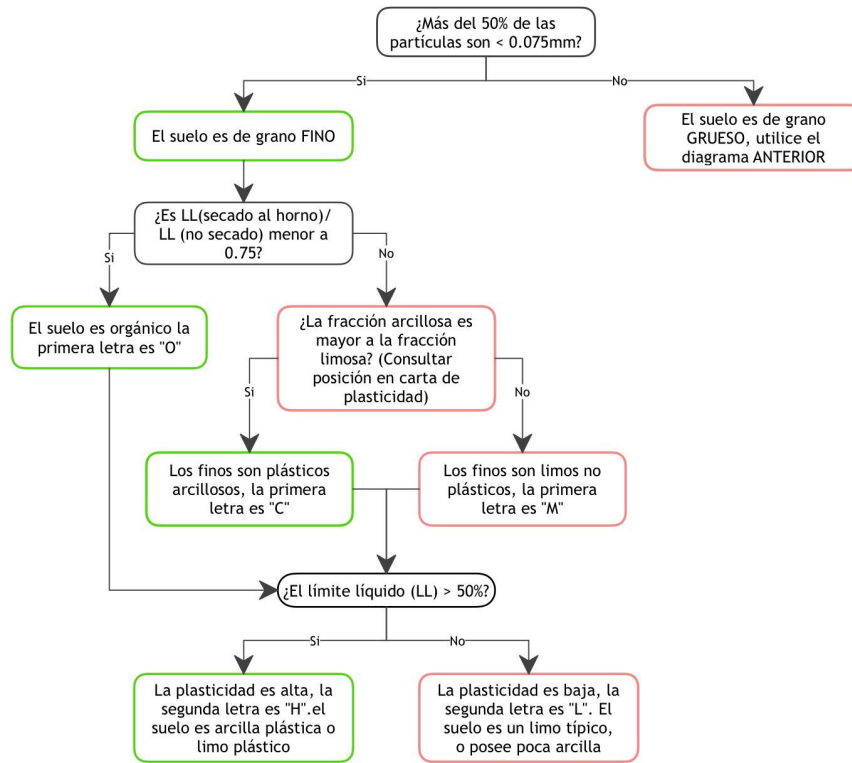


Figura 11.- Procedimiento para identificar qué tipo de suelo fino es.



Los comportamientos que se han podido identificar en los suelos dependen principalmente de las condiciones de saturación que estos presentan; subdividiéndose en *suelos parcialmente saturados* y *suelos saturados*. De forma general los comportamientos que se han observado en los materiales tipo suelo se resumen a continuación:

DRENADO	NO DRENADO	
Gravas y Arenas	Limo	Arcilla
<i>Generalmente</i>	<i>Generalmente</i>	<i>Generalmente</i>
Alta permeabilidad Alta resistencia Alto módulo de deformación	Baja permeabilidad Baja resistencia Bajo módulo de deformación	Muy baja permeabilidad Muy baja resistencia Muy bajo módulo de deformación
Granular Sin cohesión El agua no afecta de manera importante a excepción de la carga cíclica	Granular Sin cohesión El efecto del agua es importante	Granular. Con cohesión El efecto del agua es muy importante

Tabla 4.- Comportamiento de suelos conforme a sus características.



XI.- CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS

La clasificación de macizos rocosos se orienta principalmente a definir la calidad del macizo rocoso en función de su *continuidad o su semejanza con el continuo*.

La continuidad en los macizos rocosos implica una sencilla simplificación de su comportamiento razón por la cual es necesario saber en función del tamaño de la obra o sistema a analizar su calidad.

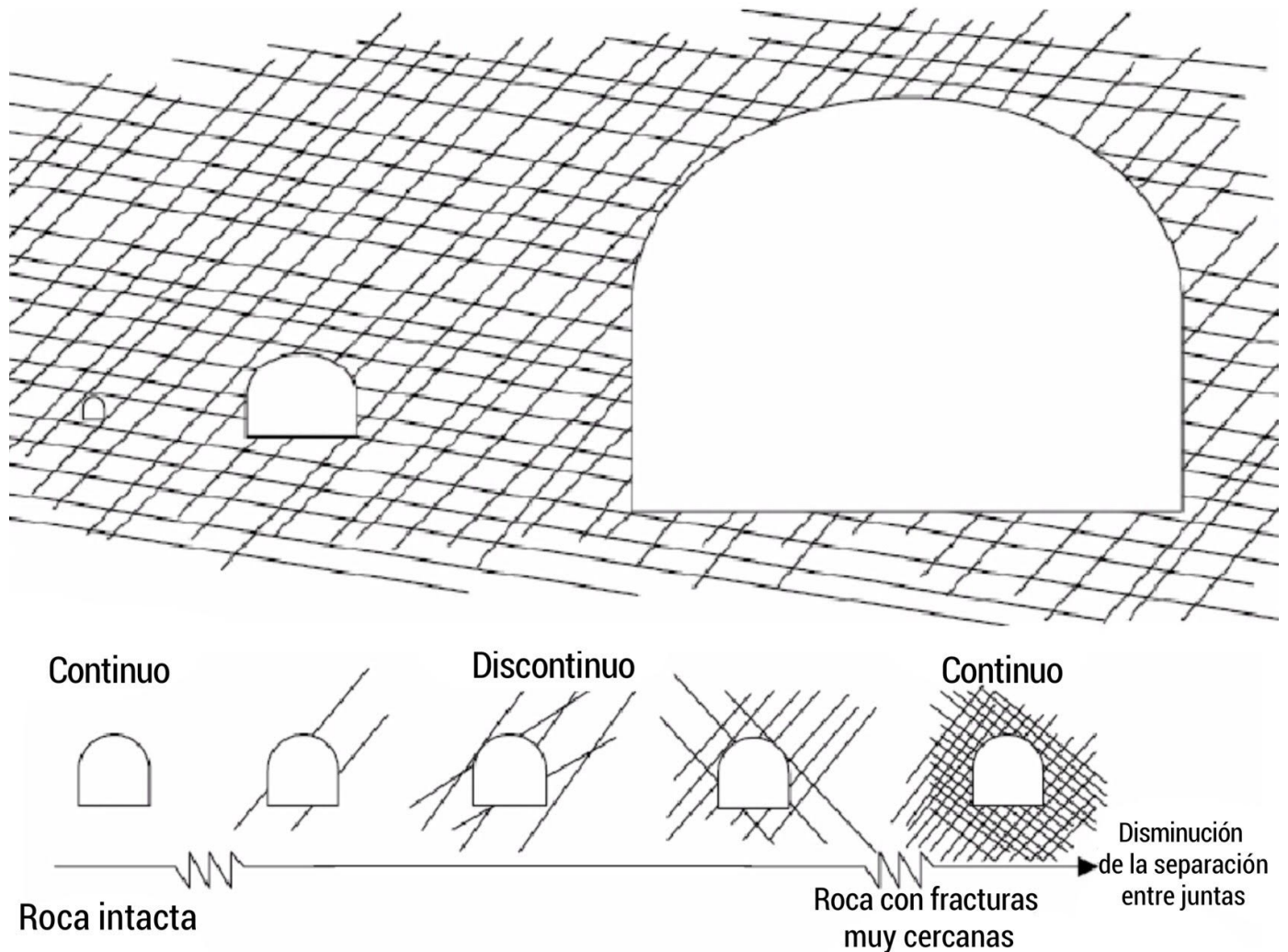


Figura 12.- Representación de la escala de un proyecto, así como si se define como continuo (CHILE), o discontinuo (DIANE).⁷²

Como se menciona anteriormente es primordial saber la magnitud del proyecto ya que se realizaría un análisis geológico adecuado sabiendo las necesidades del mismo (Fig. 12). Después de saber la escala, se hace una revisión de las discontinuidades y en base a eso se puede clasificar el tipo de medio que se está manejando, si es continuo o discontinuo. Más que nada para poder saber su comportamiento a la hora

⁷² Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.



de modificar el medio. Un macizo rocoso que se considera “continuo” (CHILE) es aquel que no tiene discontinuidades o son de grandes proporciones pero que no tienen inferencia con el proyecto, esto es cuando hay pocas discontinuidades, pero igualmente se considera continuo cuando las discontinuidades en el medio son muchas, tanto que se toma como si fuese un suelo en lugar de un macizo rocoso. Otra posibilidad es que tengamos un medio “discontinuo” (DIANE), que es cuando se encuentran conjuntos de discontinuidades que tienen relevancia en el proyecto.

La base de esta clasificación se centra en el concepto de *volumen elemental representativo*.

Existen varios sistemas de clasificación de una roca los cuales describen su composición, uno de los primeros fue el de Terzaghi que da la composición en diversos grados de unión y el relleno de las juntas, pero en los últimos años se ha desarrollado lo que es el GSI (Índice de Resistencia Geológica) que al igual que Terzaghi hace una división con respecto a las características de unión de juntas principalmente. Los puntos en que se basan las clasificaciones geomecánicas (Fig. 13) son los siguientes:

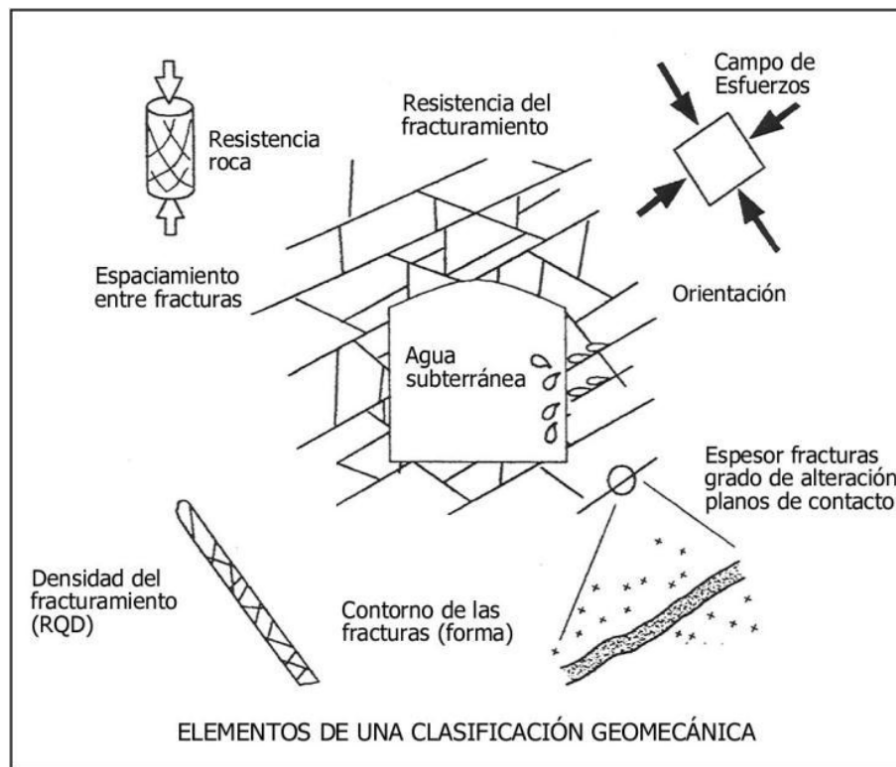


Figura 13.- Esta figura integra lo que se requiere para clasificar cualquier macizo rocoso, obtenida de Oyaguren 2004.

A continuación, se hace un resumen especificando cada una de las definiciones de la figura 13:



11.1 RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA⁷³

Saber el comportamiento de las rocas es problemático pero muy importante ya que se deben determinar las propiedades de la roca cuando se encuentran en un campo tensional compresivo. Se utilizan varias gráficas que mediante estudios y ensayos se han generado. Se tiene que tomar en cuenta la heterogeneidad de la roca, el tamaño de grano y sus propiedades geomecánicas.

Para la generación de las curvas que nos dan el comportamiento de las rocas con acción de algún esfuerzo en específico lo primordial es que mediante diversos ensayos se vean los cambios efectuados en la roca, el momento de fracturamiento, el comportamiento elástico, así como si es posible llegar a la resistencia residual. (Véase Fig. 14)

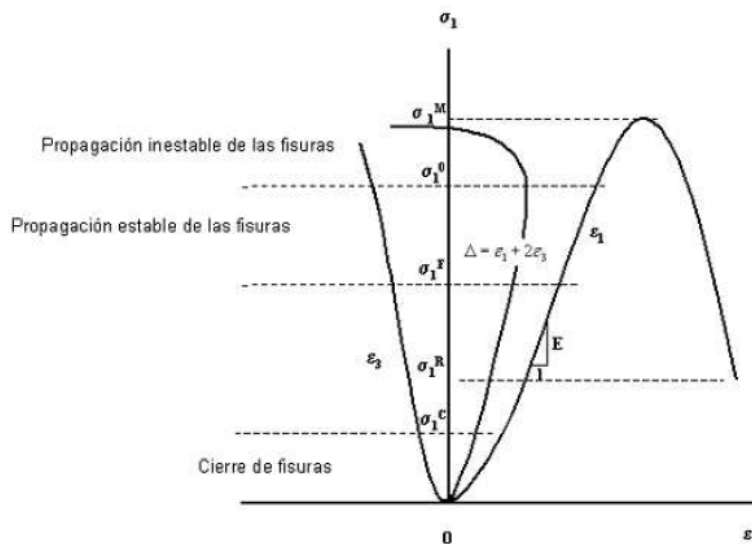


Fig. 14 Comportamiento de rocas a compresión.⁷⁴

11.1.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

Este ensayo sirve para determinar la resistencia a la compresión simple de la roca. El dato se utiliza en los principales criterios de rotura, como son Mohr-Coulomb y Hoek-Brown. Para obtener más información acerca de este ensayo se recomienda consultar el libro de Mecánica de Rocas 1 de Oyanguren.

11.1.2 ENSAYO DE CARGA PUNTUAL (ENSAYO DE FRANKLIN)

Este ensayo consiste en romper un trozo de roca entre dos puntas cónicas de acero endurecido. Sirve para la clasificación de las rocas. Para obtener resultados que sean comparables con el mismo tipo de

⁷³ Modificado de Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁷⁴ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.



roca es necesario que las discontinuidades de ésta se encuentren siempre en la misma dirección con respecto al eje que une a las dos puntas del aparato, hay que tener en cuenta que comúnmente los resultados de los ensayos varían mucho, por lo tanto, se tiene que repetir el procedimiento varias veces para poder obtener datos fiables. La clasificación de las rocas según su resistencia a compresión uniaxial propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas es (Tabla 5):

Resistencia (MPa)	Clasificación
>250	Extremadamente alta
100-250	Muy alta
50-100	Alta
25-50	Media
5-25	Baja
1-5	Muy baja
0,25-1	Extremadamente baja

Tabla 5.- Tabla de la clasificación de rocas según su resistencia a compresión uniaxial. (Oyanguren, 2004).

Para más información sobre este ensayo se sugiere consultar el libro Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004 Oyanguren.

11.1.3 ENSAYO TRIAXIAL

Se utiliza para conocer la resistencia de las rocas cuando son sometidas a un estado triaxial de tensiones. Este ensayo se lleva a cabo con dos tensiones principales menores o sea σ_2 y σ_3 .

El ensayo se lleva a cabo con probetas parecidas a las utilizadas en los ensayos de compresión simple, pero ésta es rodeada por una camisa de goma que se coloca dentro de una célula en la que se puede inducir líquido a presión que comúnmente es agua o aceite, la camisa de goma tiene como objetivo que el líquido exterior no toque a la roca, pero la presión que ejerce éste debe ser suficiente para que se transmita a la roca. La deformación axial y circunferencial de la muestra se suelen medir, a veces mediante bandas extensométricas. Para mayores detalles consultar Mecánica de rocas 1 de Oyanguren.

11.1.4 ENSAYOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE TRACCIÓN

El ensayo más usado para este fin es el ensayo brasileño el cual consiste en comprimir una probeta cilíndrica de roca, cuando este cilindro es sometido a una compresión diametral se rompe a lo largo del diámetro como consecuencia de las tensiones de tracción generadas en dirección perpendicular al mismo. Haciendo un estudio de distribución de tensiones en un disco al que se le aplica una carga diametral se llegó a la conclusión que a lo largo del diámetro excepto en la periferia de éste se genera una tensión horizontal uniforme. Para mayores detalles consultar Mecánica de rocas 1 de Oyanguren.



1 1.2 AGUAS SUBTERRÁNEAS⁷⁵

La excesiva presión del agua y/o su flujo en el macizo causa inestabilidad, pero aumenta considerablemente cuando aparte de esto existen zonas de debilidad (Imagen 36). La presión del agua disminuye en la masa rocosa en la que se lleva a cabo una excavación ya que es drenada por las juntas, aún así, el agua reduce la resistencia del material rocoso y contribuye a una desestabilidad general de éste, especialmente en materiales mixtos donde la presión se construye debajo de zonas impermeables y cercanas a zonas débiles. Otro de los efectos producidos por el agua subterránea es en sí la estabilidad que le da a las fracturas o fallas, así como la resistencia al cizallamiento.

Como se menciona en el párrafo anterior la resistencia al cizallamiento depende mucho de la litología ya que, si tratamos con una arenisca, ésta obviamente por el tamaño de los poros y su baja permeabilidad, es capaz de almacenar grandes cantidades de agua, lo que genera, de acuerdo a la ley de Terzaghi, indica que cuando se aplica un esfuerzo cortante y al no existir rose entre las partículas, y gracias a la presión intersticial entre los granos no haya una acción cortante en el medio.

Por otro lado, si se trata de un macizo rocoso con presencia de juntas que están saturadas en agua y al ser sometidas a presión, estas juntas que separan los bloques sufren una pérdida en la presión efectiva entre ambos labios de la junta y gracias a este fenómeno se reduce potencialmente la resistencia al corte creada por la fricción entre juntas.

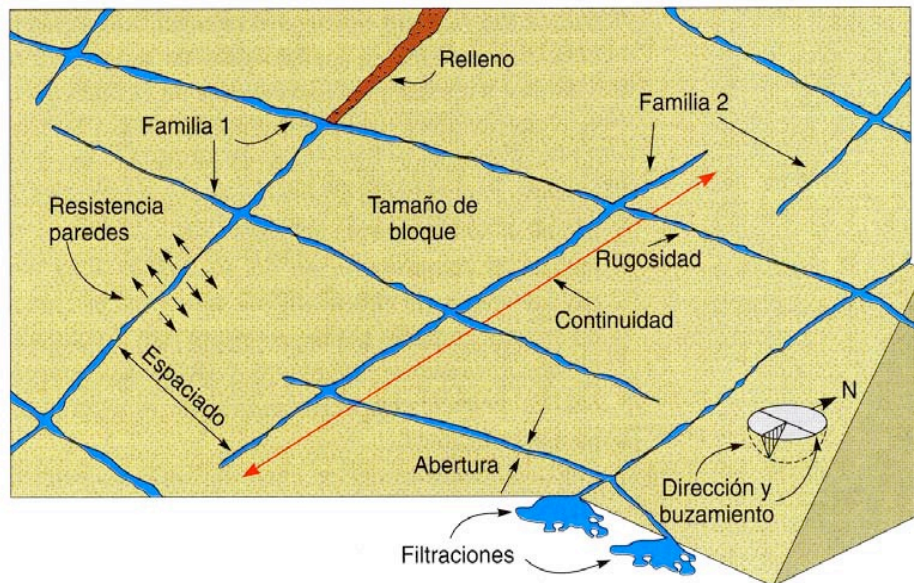


Imagen 36.- Representación de un macizo rocoso con influencia del agua subterránea, al igual están presentes diversas características que se pueden encontrar en las discontinuidades que se verán más adelante.⁷⁶

⁷⁵ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁷⁶ Obtenida de <https://www.emaze.com/@AQTFZWRR/clase-4-estabilidad-de-taludes-parte-2-copy2>



1 1.3 EFECTO DE LOS ESFUERZOS⁷⁷

11.3.1 ESFUERZOS IN SITU

Estos esfuerzos tienen gran impacto en la estabilidad de estructuras subterráneas, sobre todo cuando exceden la resistencia del macizo rocoso, aunque no solo puede causar la inestabilidad, también un bajo nivel de esfuerzos reduce la estabilidad en las juntas en los macizos ya que en éstas tienen bajos esfuerzos normales (Fig. 15).

Al momento de realizar una excavación los esfuerzos iniciales se perturban y empiezan a buscar nuevamente el equilibrio por lo tanto se tienen que tomar en cuenta las tensiones alrededor de la abertura, estas dependen de la magnitud y dirección de los esfuerzos principales y la geometría de la abertura, se analiza el efecto de dichas tensiones en la roca y el estrés que se crea en el contorno de la excavación ya que es importante conocerlos para saber cómo se comporta el terreno.

Comúnmente nos encontramos en un medio anisotrópico y esto da variaciones en la tensión tangencial que se encuentra en los límites de la abertura, la tensión tangencial varía en función a la forma de la excavación más que nada.

Con la tensión tangencial pueden ocurrir dos cosas dependiendo del tipo de roca que se tenga, si estamos en presencia de una roca frágil, tenemos desprendimientos, pero si es más dúctil lo que tenemos ante una sobrecarga es una deformación y/o deformación plástica. En una excavación podemos tener este tipo de comportamientos, dependiendo del tipo de litología, los diferentes esfuerzos y condiciones de la zona, como ya se había mencionado anteriormente en la parte de excavaciones subterráneas.

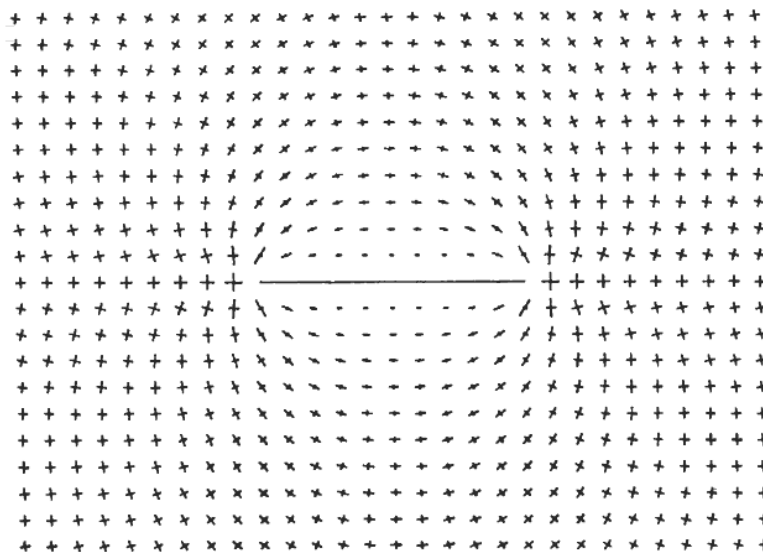


Figura 15.- Representación de los esfuerzos en presencia de una discontinuidad, cuando los esfuerzos se acercan a las discontinuidades se vuelven paralelos al plano de la discontinuidad (Hudson, 2003).

⁷⁷ Obtenido de Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.



11.4 ESPESOR DE FRACTURAS GRADO DE ALTERACIÓN, PLANOS DE CONTACTO Y FORMA DE LAS DISCONTINUIDADES.⁷⁸

Al momento de estudiar los macizos rocosos, se debe enfatizar en observar las condiciones en la que se encuentran las discontinuidades, pues son un factor muy importante que condiciona el comportamiento de la roca en general. Un factor primordial es la condición del plano entre las juntas, es decir, la rugosidad.

11.4.1 DISCONTINUIDADES LISAS

En discontinuidades lisas (Fig. 16), si se le realiza un ensayo de corte con tensión normal constante y se representa la evolución del comportamiento, ésta arroja una gráfica que muestra la respuesta de movimiento de la discontinuidad, donde actuarán dos resistencias; una de pico y otra residual. Esta respuesta a la resistencia se conoce como resistencia al corte, en el cual entra en juego otra variable, el ángulo de inclinación de la junta, que condicionará el valor del ángulo de fricción interna. En conjunto, le permite al geotecnista poder estandarizar y dándole valores a ésta y otras más condiciones de las juntas logrará caracterizar el comportamiento de los macizos al movimiento.

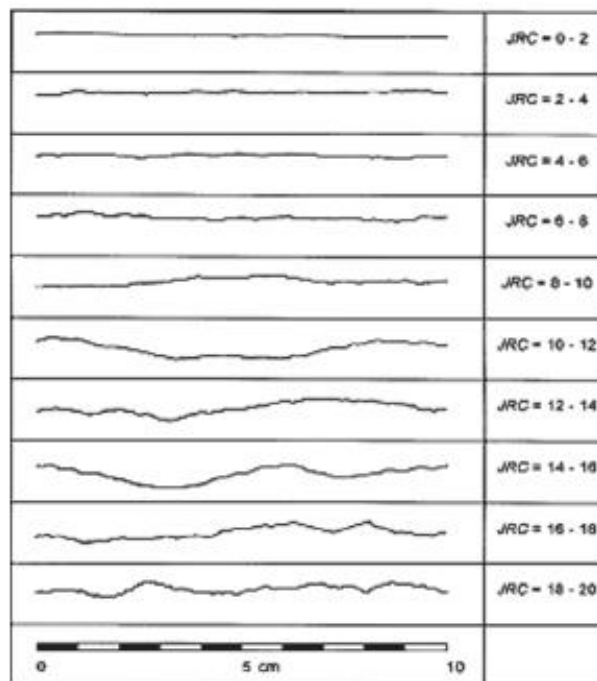


Figura 16.- Perfiles de rugosidad junto con el valor atribuido al coeficiente de rugosidad de la discontinuidad JRC (Hoek, 2007)

⁷⁸ Modificado y resumido de Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.



11.4.2 DISCONTINUIDADES RUGOSAS SIN RELLENO

Cuando tenemos una discontinuidad rugosa, regular y con un ángulo de inclinación se aumenta la fricción, esto hace que el desplazamiento tenga una componente normal y no solo cortante, si tenemos tensiones normales más elevadas, la resistencia del material será alcanzada y los dientes de sierra tenderán a romperse dando como resultado una resistencia más relacionada con el material rocoso intacto.

Cuando tenemos este tipo de discontinuidades es preciso decir que la resistencia es muy buena, ya que la fricción hace que sea muy difícil que haya un deslizamiento, pero para esto los labios de la fractura deben de tocarse, y la fractura debe de ser cerrada para que se logre la fricción adecuada (Figura 17).

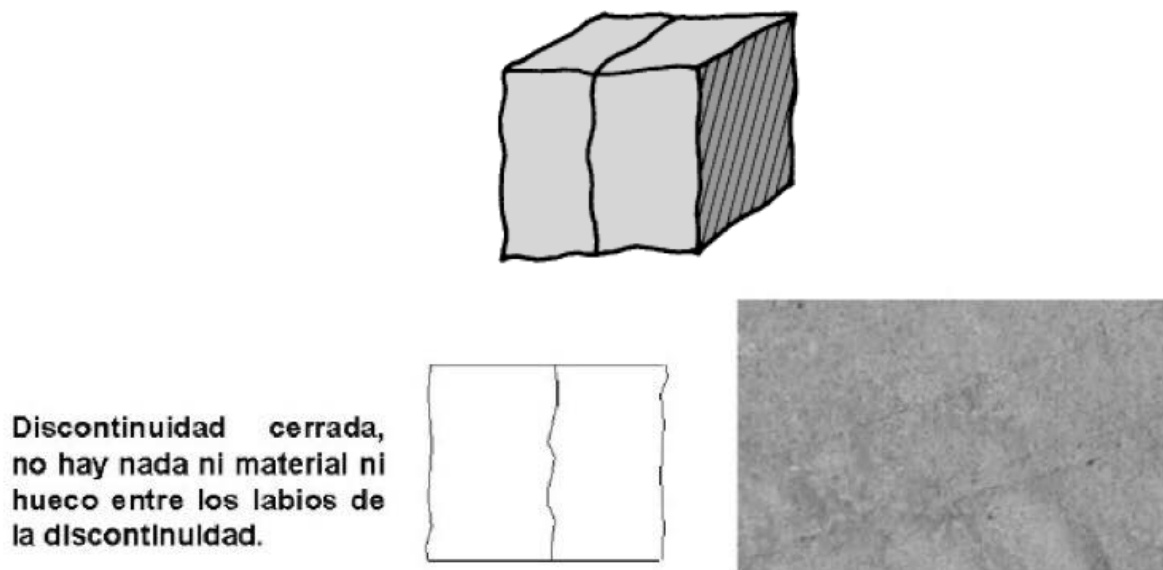


Figura 17.- Representación gráfica de lo que sería una fractura sin relleno y cerrada (Oyanguren 2004).

Criterio de Roturas de Juntas de Barton

En la naturaleza las discontinuidades comúnmente son rugosas e irregulares, Barton las analizó y dependiendo de si estaba meteorizada o no, se tiene una ecuación para ver su índice de rugosidad, donde ocupa las variables JRC que es el coeficiente de rugosidad de la junta y JCS que es la resistencia a compresión simple de los labios de la discontinuidad. El ángulo básico de fricción que suele variar de 25° a 30° para rocas sedimentarias y para rocas ígneas y metamórficas de 30° a 35° . Él también creó un método alternativo el cual es denominado el peine de Barton el cual se obtiene al medir la amplitud de las asperezas y la longitud de la junta, y también señala que el JRC se puede estimar a partir de ensayos de inclinación de campo o "tilt tests".

La resistencia da compresión simple de los labios de la discontinuidad o JCS se puede obtener con la aplicación del martillo de Schmidt tipo L sobre la discontinuidad y utilizando el ábaco propuesto por Miller. El valor de JCS deberá de ser menor a la resistencia a compresión simple de la roca sana.

Interpretación del Criterio de Barton

Mediante el análisis de las ecuaciones de Barton y los ensayos que se hicieron en la aplicación de la fórmula de Barton nos damos cuenta de que los factores de geometría JRC y la resistencia de asperezas JCS se potencian mutuamente.

Efecto de Escala

Todo depende de la escala a la cual sea vista, ya que las discontinuidades presentan diferentes rugosidades dependiendo de su tamaño, ya cuando se mete la dilatancia en la ecuación la rugosidad disminuye a medida que se aumentan las dimensiones de la muestra lo que nos indica que el ángulo de fricción decrece al aumentar el tamaño tanto de la discontinuidad como de la muestra.

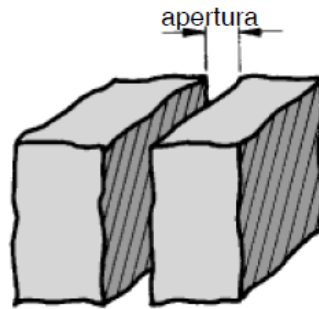
Fricción y Cohesión Instantáneas

El coeficiente de seguridad siempre ha sido importante en la mecánica de rocas y con respecto al deslizamiento de taludes a través de una discontinuidad se expresan en términos de la fricción y la cohesión y Barton creó una relación no lineal en la que es posible representar la tensión normal en una junta de manera más exacta que la de Mohr-Coulomb.

11.4.3 DISCONTINUIDADES ABIERTAS

Este tipo de discontinuidades son aquellas que presentan una apertura, la cual no está rellena, este espacio entre los labios de la junta puede llegar a medir desde 0.25 mm a 1 m (Figura 18), cuando este tipo de discontinuidades está presente es importante ver la longitud de la discontinuidad y observar de qué manera va a afectar la excavación, ya que al no tocarse los labios no importa si son lisos o rugosos, ya que no habría impedimento alguno a la hora de que le quiten el soporte que uno de los bloques se deslice, se tiene que tomar especial precaución si hay grietas de tensión que pudieran facilitar este movimiento, si es así se tendría que poner el sostenimiento adecuado.

Si la discontinuidad está ligeramente abierta y no existe relleno se toma en cuenta únicamente el ángulo de fricción. Cuando no existe relleno el plano de deslizamiento pasa a manejarse enteramente a través de la zona donde existe contacto entre los labios de la discontinuidad, en estos casos la resistencia al esfuerzo cortante depende únicamente de la resistencia de las paredes de la discontinuidad.



Discontinuidad abierta, existe una distancia entre ambos labios de la discontinuidad, sin ningún tipo de material.

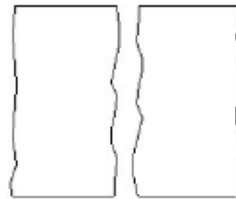


Figura 18.- Representación de una discontinuidad abierta, la cual no contiene ningún tipo de relleno, la abertura puede variar de tamaño va desde 0.25mm-1m o más (Oyanguren 2004).

11.4.4 DISCONTINUIDADES CON RELLENO

Las diferencias entre estas discontinuidades y las anteriores es abismal, ya que el relleno de las discontinuidades comúnmente se trata de materiales arcillosos lo cual en lugar de ayudarnos como en la anterior nos perjudica ya que la resistencia al corte disminuye drásticamente, y si tenemos una superficie rugosa, el relleno tiene que ser de un espesor mayor para que tengamos problemas con la resistencia al corte.

Cuando tenemos una discontinuidad con relleno (Figura 19) según Goodman todo depende del espesor del relleno y la aspereza de éste. Él nos dice que conforme el relleno aumenta vamos perdiendo la resistividad original y se va asemejando a la del relleno, es decir que si tenemos una superficie rugosa estable, la cual se va rellenando poco a poco y el espesor del relleno aumenta; este se vuelve más débil y por lo tanto el coeficiente de seguridad disminuye (Tabla 6).

TIPOS	EJEMPLOS	COMPORTAMIENTO
Arcillas	Caolinitas, montmorillonita	Ablandamiento con o sin expansión importante.
Fragmentos granulares	Fragmentos de roca	Acceso al agua, transmiten algo de resistencia por fricción
Materiales desleíbles	Clorita, sericita	Son evacuados fácilmente
Materiales soluble	Calcita	Se disuelven y eventualmente son evacuados.

Tabla 6.- Esta tabla nos muestra los tipos de relleno que puede tener una discontinuidad y el comportamiento que llegarían a tener.

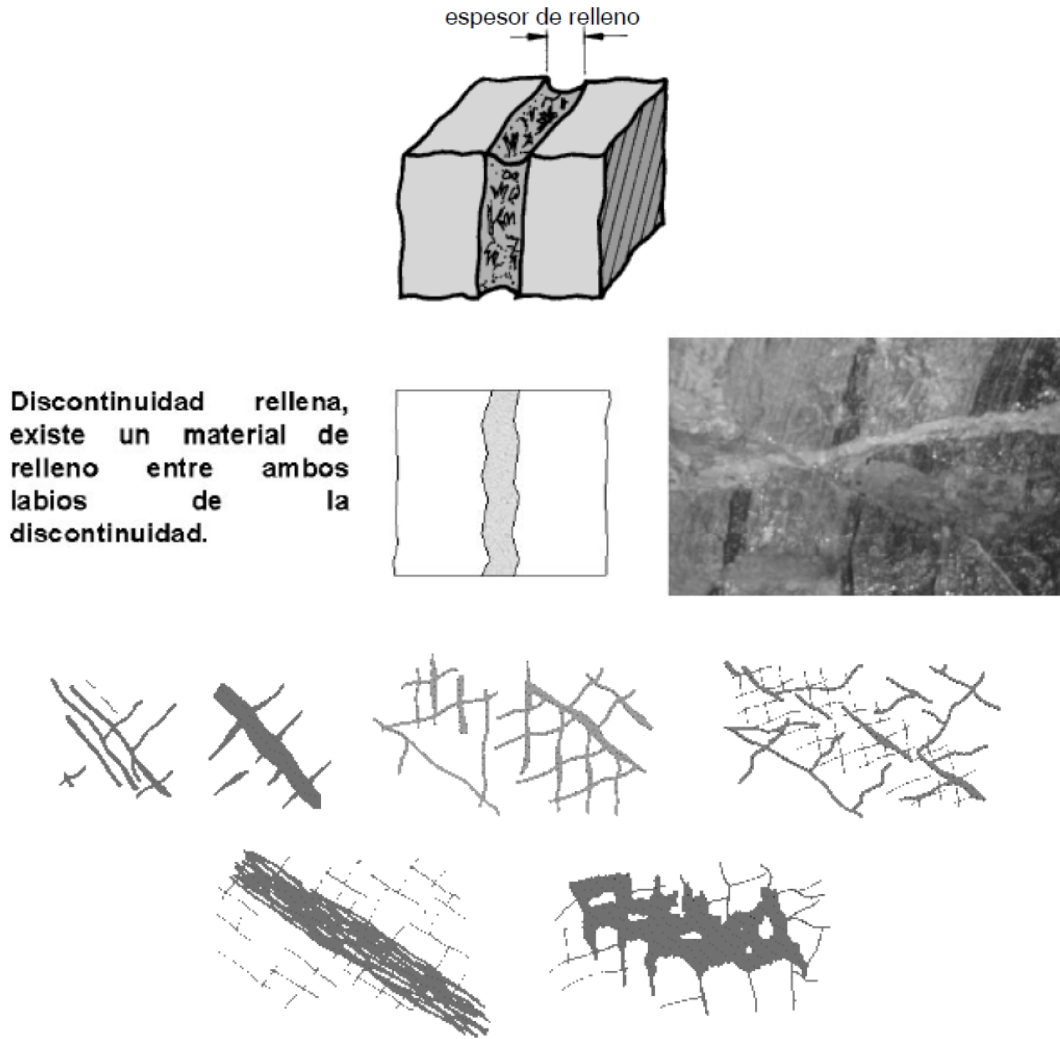


Figura 19.- Representación de discontinuidades con presencia de relleno. El relleno puede ser de diversos materiales, comunmente es del tipo arcilloso con una resistencia menor a la del macizo rocoso, pero otras veces puede ser un cementante o alguna remineralización y esto puede darle más resistencia al macizo rocoso (Oyanguren 2004).

11.4.5 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE AGUA

Debemos tener en cuenta que la presión de agua en un macizo rocoso es muy importante ya que involucra aspectos como la tensión normal en condiciones de régimen permanente en donde la presión alcanza un equilibrio en el macizo rocoso.

11.4.6 PARÁMETROS DEFORMACIONES (RIGIDEZ Y DISTANCIA)

Rigidez cortante o tangencial

Esta rigidez es útil para relacionar la tensión cortante aplicada sobre una muestra frente el desplazamiento de corte sufrido por el bloque que se desplaza, en donde existe un parámetro en donde los niveles de tensión suelen tomar el valor medio de la pendiente.



Rigidez normal

En esta rigidez la relación existente de la tensión normal muestra un desplazamiento perpendicular a la dirección de las juntas en donde por medio de métodos numéricos se puede conocer el comportamiento de una junta, para poder aplicar todos estos conceptos es necesario conocer otros puntos.

Dilatancia

Como una propiedad mecánica de las rocas que se manifiesta con presiones de confinamiento bajas, aumentando su afección con la deformación principal en la fase previa a la rotura, propone su cuantificación mediante la determinación del ángulo de dilatancia de la cual depende, principalmente, de la tensión de confinamiento, del nivel de deformación plástica y de la escala, disminuyendo está a medida que aumentan estas variables.

11.4.7 ENSAYOS DE LABORATORIO

El ensayo de corte directo es el más utilizado en pruebas de laboratorio para determinar el comportamiento de las discontinuidades, en algunos proyectos se ensaya el ángulo de fricción básica de los materiales rocosos, poniéndolos en posición inclinada, a esto se le puede llamar “tilt-test”.

Ensayo de Corte Directo

Se basa en ensayar mediante la aplicación de un esfuerzo cortante una discontinuidad. El cual es de manipulación complicada para encajar las muestras correctamente en el molde o en la caja de ensayo. Se utiliza una caja de corte formada por dos mitades o moldes, teniendo uno fijo y otro móvil, la discontinuidad debe quedar en dirección paralela al movimiento de corte. Las máquinas básicamente constan de dos sistemas de aplicación de tensión:

- Tensión normal
- Tensión de corte

Se colocan dos dispositivos de desplazamientos que pueden ser los comparadores o medidores de la deformación longitudinal mecánicos con transductores electrónicos.

El procedimiento consta de los siguientes puntos (Ramírez Oyanguren et al., 1984):

- Se hace encajar la muestra que contiene a la discontinuidad, que deberá de coincidir la discontinuidad con el plano de corte.
- Se moldea el núcleo en hormigón o mortero colocándose la mitad superior de la caja y aplicándose una ligera carga normal para evitar movimientos.
- Se aumenta la carga normal hasta el valor indicado para el ensayo el cual debe ser constante.

- Se aplica gradualmente la carga tangencial hasta que se alcance la resistencia pico, hasta que se observe que no se necesita una carga mayor para mantener el proceso de corte, esta es la carga residual.
- Cuando no se ha llegado a la resistencia residual al llegar al máximo desplazamiento con respecto a la longitud de la discontinuidad se repite de nuevo el ensayo hasta obtener dicha resistencia residual que es la resistencia al corte que posee el material después de haber ocurrido la falla.

Ensayo de inclinación de laboratorio para obtener el ángulo de fricción básico

El ángulo de fricción básico es el ángulo de inclinación de una placa sobre otra en el momento del deslizamiento el cual Barton (1976) definió.

Stimpson (1981) aplicó con muestras cilíndricas de roca en lugar de bloques o placas como Barton indicaba, tres testigos para realizar el ensayo de inclinación dejando que una de ellas deslizará sobre las otras dos, siendo este ensayo muy sencillo y económico, de gran utilidad para aplicar el modelo Barton-Brandis de estimación de las propiedades resistentes de las discontinuidades rugosas sin relleno. Esto se calcula con su fórmula:

$$\phi_b = \arctan\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \tan \alpha\right)$$

1 1.5 OTROS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CLASIFICACIÓN SON:

11.5.1 TENSION EFECTIVA, HINCHAMIENTO Y ALTERABILIDAD DE LAS ROCAS⁷⁹

Tensión Efectiva

Las rocas poseen poros y fisuras que pueden estar interconectados o no, en el caso de que lo estén estos pueden tener agua o aire lo cual hace que el comportamiento de la roca varíe principalmente en su deformidad y resistencia, en caso contrario esta influencia se reduce. Terzaghi estableció que la resistencia de los suelos saturados, así como su cambio de volumen al ser comprimidas no dependen de la tensión total aplicada, si no de la tensión efectiva. Esto es aplicado siempre y cuando haya una interconexión entre poros.

⁷⁹ Tomado de Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.



Hinchamiento y Alterabilidad

El hinchamiento es el aumento del volumen de una roca por la humedad, y se modifica tensionalmente, normalmente por distensión o relajación, es común en rocas arcillosas las cuales tienen minerales hidrófilos los cuales fijan el agua. Una roca con estas características cuando sufre de hinchamiento puede producirse una rotura del cementante por la acción de tensiones de tracción lo cual disminuye la resistencia de la misma. Es un hecho probado la resistencia disminuye al aumentar la humedad hasta un 50%. Otra causa de la reducción de la resistencia cuando hay cambios continuos de expansión y retracción nos puede generar un alargamiento de las microgrietas.

Ensayos

Existen varios ensayos con los que se puede detectar la susceptibilidad al hinchamiento de una roca: El "jar slake test" que consiste en sumergir una roca y ver su velocidad de desmoronamiento; el de azul de metileno que caracteriza la superficie específica y el carácter arcilloso del material, realizando un análisis mineralógico por R.X. para conocer los minerales arcillosos. También las humedades de saturación, para delimitar las de alta media y baja durabilidad.

Con respecto a la Sociedad Internacional de la Mecánica de Rocas (SIMR) tenemos tres ensayos:

- Medida de la presión axial de hinchamiento a volumen constante.
- Medida de la deformación axial de hinchamiento en una muestra confinada lateralmente y sometida a cargas axiales y constantes.
- Medida de la deformación de hinchamiento libre en dirección axial.

Por lo tanto, las clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos deben de incorporar lo siguiente:

- Material de la roca tomando en cuenta su homogeneidad, esquistosidad, resistencia, sus propiedades físicas o el comportamiento de ésta.
- Meteorización y alteración de las rocas.
- Características de unión, eso quiere decir que toma en cuenta la rugosidad, el tamaño del bloque el grado de unión o la densidad de las articulaciones.
- Zonas de debilidad, cualquiera que esta sea, como fallas, fracturas, tamaño, estructuras o composición.

Las características de los macizos rocosos se pueden dividir en dos grupos, uno que se caracteriza por tener bloques y estar situado en zonas de debilidad y el otro que está enfocado solamente a zona de debilidad y fallas. La composición y la estructura de los macizos que rodean a un túnel tienen una influencia en el comportamiento del terreno. Hay en sí 3 grupos principales:

- Grupo I: composiciones del macizo rocoso generales que ocurren entre las zonas de debilidad o de fallas (a menudo denominados la composición global o general).



- Grupo II: zonas de debilidad y fallas.
- Grupo III: algunos minerales y tipos de roca con propiedades especiales que puede afectar al comportamiento del suelo.

Composición

La clasificación de composición más aceptada es la siguiente:

- Clase A: Rocas Masivas. Roca compuesta por pocos elementos y sus propiedades son sólidas y dominan el ambiente.
- Clase B y C: Materiales Articulados o en Bloques. Rocas con menor resistencia, que van con un menor a mayor grado de unión y las zonas de debilidad influyen en el comportamiento.
- Clase D: Materiales Rocosos de Partículas. Esto incluye partículas, granos o fragmentos con poca o ninguna unión, y, además, roca sedimentaria no consolidada. La conducta en este grupo es el resultado de las interacciones entre bloques o fragmentos, como es el caso en un material a granel.
- Clase E: Rocas o Macizo Roco con propiedades especiales diferentes de las otras clases. Esta clase incluye algunos materiales que también se pueden encontrar en algunas fallas o zonas de debilidad como lo son arcillas o materiales de cementación⁸⁰.

Zona de debilidad

Esto se refiere a las zonas donde tenemos fallas o fracturas, a las zonas de empuje, capas de roca débil o rota, etc. En sí es cuando las propiedades mecánicas disminuyen en comparación con la roca en buen estado. Otro de los factores son las condiciones hidrológicas ya que en las fracturas o fallas pueden tener relleno y este material pueden ser arcillas y por lo tanto con el agua tener la propiedad de expandirse. La separación de las juntas también influye en el comportamiento de la zona. Palmstrom (1995) dice que cuando esta excede los 20 m la estabilidad disminuye.

⁸⁰ Stille H. and Palmstrom A.: Ground behaviour and rock mass compositions in underground excavations. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, 2008, pp. 46 – 64.



11.6 PUNTOS A TOMAR EN CUENTA EN LA CLASIFICACIÓN:⁸¹

11.6.1 EFECTO DE TERREMOTOS Y VOLADURAS INDUCIDAS POR VIBRACIONES

Comúnmente cuando hay un movimiento telúrico las estructuras subterráneas no sufren de daños en sí, pero cuando tenemos una roca de calidad pobre y con fallas cercanas tenemos lo que es desprendimiento e inestabilidad. Con un sismo tenemos un cambio en los esfuerzos que rigen la zona.

11.6.2 EFECTO DEL TAMAÑO Y LA FORMA DE EXCAVACIÓN

Como ya se había, dicho la forma influye mucho a la hora de ver la estabilidad, pero también el tamaño es un factor importante y tanto éste como la forma se pueden ajustar al tipo de condiciones que hay en la zona. El tamaño es un factor importante ya que conforme mayor sea la abertura la deformación aumentará.

La continuidad y la discontinuidad del macizo es importante para saber la estabilidad ya eso establece límites, pero en sí el problema recae en el tamaño de los bloques ya que este no es parámetro lineal por lo tanto se tienen las siguientes consideraciones:

- Continua-Intacta: Tenemos pocas juntas o el espacio entre ellas grande.
- Discontinua en bloques: macizo fracturado con bloques de decímetros cúbicos hasta metros cúbicos.
- Continuo Voluminoso: Partículas, granos o fragmentos de roca sin cementante al igual que rocas sedimentarias demasiado fragmentado con tamaños de decímetros a milímetros cúbicos.

Para el análisis de estabilidad es necesario poder clasificar bien si tenemos un material continuo o discontinuo ya que a partir de ese momento sabremos qué tipo de comportamiento se puede tener.

11.7 CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA

11.7.1 ¿QUÉ ES LA CLASIFICACIÓN RMI?⁸²

El RMI (Rock Mass Index) es un sistema basado en parámetros de masa de roca. El sistema combina el esfuerzo compresivo de la roca intacta y un conjunto de parámetros (JP).

Para rocas diaclasadas:

$$RMI = \sigma_c x JP = 0.2 \sqrt{jC} x V b^D \quad (D = 0.37 j C^{0.2})$$

⁸¹ Tomado de Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁸² Palmstöm A., Recientes desarrollos en la estimación des sostenimiento en roca mediante RMI (2003), Universidad Nacional de Colombia, Medellin Colombia, pp. 23-43

Para rocas masivas:

$$RMi = \sigma_c x f_\sigma = \sigma_c (0.05/Db)^{0.2} \approx 0.5\sigma_c$$

σ_c = resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.

jC = Factor de estado (o condición) de las diaclasas, esto nos lleva a otras variables que son, el tamaño y continuidad de las diaclasas (jL), la rugosidad de las fracturas (jR), y el grado de alteración de estas (jA), expresado como:

$$jC = jL * \frac{jR}{jA}$$

Vb = volumen del bloque expresado en m^3 ; generalmente se ocupa el volumen promedio. $Db=(Vb)^{1/3}$ e la representación del diámetro equivalente del bloque en m.

JP = Parámetro de la junta o diaclasado; está compuesta por el volumen del bloque y tres juntas características (rugosidad, alteración y tamaño).

$$JP = 0.2\sqrt{jC}xVb^D$$

f_σ = parámetro de masividad

$$f_\sigma = (0.05/Db)^{0.2}$$

Este parámetro representa un ajuste por el efecto de escala en la resistencia a la compresión en una roca masiva.

El RMI puede ser aplicado para:

Determinar las constantes s y m en el criterio de falla Hoek-Brown para masas de roca, para medir parámetros como: el esfuerzo de cizalla de masas continuas de roca. Resolver la respuesta de los suelos mediante curvas usando las constantes s y m , cuantificar la clasificación descriptiva de NATM, Estimar la estabilidad de la roca y su soporte debajo del suelo.

La siguiente figura (Fig. 20) presenta la aplicación del RMI y sus parámetros mecánicos en rocas

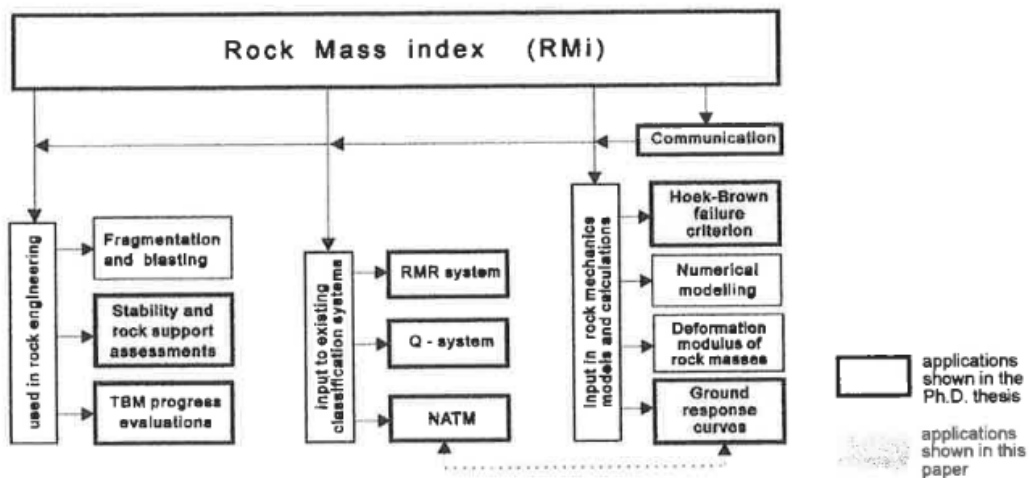


Figura 20.- Aplicaciones de RMI y parámetros que lo usan tomada de Palmstrom 1995 a.



11.7.2 ¿QUÉ ES LA CLASIFICACIÓN RQD?⁸³

La clasificación RQD, se obtiene mediante un muestreo realizado con un extractor de núcleos, al observar las discontinuidades que están presentes en éstos. Estos datos se obtienen mediante la cuantificación del porcentaje de los testigos (núcleos) que sean mayores a 10 cm. Esto permite estimar el grado de fracturación del macizo rocoso. Es importante tomar en cuenta que el valor obtenido mediante este método es influenciado por la técnica de sondeo, la dirección en la que se toma el muestreo, su diámetro y el cuidado con el que se extraen los núcleos.

11.7.3 ¿CUÁL ES LA CLASIFICACIÓN RMR?⁸⁴

El RMR es la clasificación creada por Bieniawski, la cual evalúa la calidad del macizo rocoso mediante la resistencia a la compresión simple, el RQD, el espaciamiento entre juntas, presencia de agua y la orientación de las discontinuidades.

Para obtener el valor de la resistencia a la compresión simple se puede realizar el ensayo o estimarla con el uso del Martillo de Schmidt.

Con respecto al RQD se obtiene como se mencionó anteriormente.

El espaciamiento entre juntas es básicamente definir discontinuidades estructurales que se encuentran en el medio y medir el espaciamiento que hay entre los planos de discontinuidad de cada familia, hay una correlación directa de este punto con el RQD.

La naturaleza de las juntas se analiza, primero que nada, con el punto anterior, si es una discontinuidad abierta si está rellena o no; la continuidad de la discontinuidad (dimensión) según su rumbo y echado; la rugosidad de los labios de la discontinuidad y la resistencia de los labios de la discontinuidad.

Cuando se está evaluando un macizo diaclasado el agua tiene mucha influencia, debido a las alteraciones que puede causar en el comportamiento del macizo rocoso, por ello se debe estimar el flujo del agua en L/min cada 10 m del túnel, y clasificarse mediante su contenido de agua como seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte.

Se delimita el macizo conforme a las discontinuidades existentes para así establecer dominios estructurales. Así se manejan básicamente zonas estructuralmente homogéneas.

11.7.4 ¿QUÉ ES EL ÍNDICE DE CALIDAD Q? (CLASIFICACIÓN DE BARTON)⁸⁵

Esta clasificación se cataloga los macizos rocosos mediante el índice de calidad Q que se basa en los siguientes parámetros:

J_n Número de familias juntas.

⁸³ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁸⁴ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁸⁵ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.



- J_r Rugosidad de las juntas.
 J_a Meteorización de las juntas.
 J_w Coeficiente reductor que tiene en cuenta la presencia de agua.
SRF Factor de Reducción de Esfuerzo, en sus siglas en inglés sería Stress Reduction Factor, y este factor depende de los esfuerzos existentes en el macizo.

El valor de los parámetros J_r y J_a depende también de la presencia del relleno y el tamaño de las juntas. Mediante los parámetros determinados anteriormente se define la calidad del macizo rocoso con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Donde el primer cociente, RQD/J_n , representa el tamaño de los bloques.

J_r/J_a estima la resistencia al corte entre bloques.

J_w/SRF indica el estado de esfuerzos presentes en el macizo.

11.7.5 CUÁL ES LA CLASIFICACIÓN GSI (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX)⁸⁶

Esta clasificación es básicamente cualitativa. Se realiza mediante la observación de la estructura del macizo y las características geomecánicas de las superficies de discontinuidad existentes. Esta clasificación combina dos aspectos que son muy importantes a la hora de evaluar el comportamiento de un macizo, el primero sería su fracturación, o sea el tamaño y la forma de los bloques, y la resistencia al corte de las discontinuidades.

La clasificación GSI se basa en el comportamiento isótropo del macizo rocoso, eso quiere decir que independientemente de dónde se aplique el esfuerzo o la carga, se debe de comportar igual en todos los sentidos, por lo tanto, es inconveniente utilizar esta clasificación cuando el macizo tiene una dirección estructural dominante que controla por su debilidad la rotura del macizo rocoso. Igualmente, no es recomendable usar este método con rocas con bajo fracturamiento y de alta calidad, ya que en ese caso la estabilidad depende básicamente de la resistencia de las discontinuidades.

En la tabla (Tabla 7) siguiente se puede apreciar el índice de resistencia geológica (GSI) para macizos rocosos fracturados.

⁸⁶ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

ROCAS DIACLASADAS (Hoek and Marinos, 2000)
 A partir de la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades, se estima un valor promedio del GSI. No se debe tratar de ser muy preciso. Un rango de 33-37 es más realista que un GSI=35. Note que la tabla a macizos estructuralmente controlados por fallas, donde planos estructurales débiles están presentes en una dirección desfavorable con respecto al frente de excavación, estos podrán dominar el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteración como resultado de los cambios de humedad que pueden reducirse cuando el agua está presente. Cuando trabajamos en rocas de regular o mala calidad, cambian las condiciones por el cambio de humedad. La

<p>CONDICIONES DE SUPERFICIE</p> <p>MUY BUENAS Superficies muy rugosas, superficies no meteorizadas, frescas</p> <p>BUENAS Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro</p> <p>REGULAR Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas</p> <p>POBRE Superficies con espejos de falla, con alto grado de meteorización y rellenos compactos o rellenos de frag.</p> <p>MUY POBRE Superficies con espejos de falla, con alto grado de meteorización con rellenos de arcilla suave.</p>		DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE →			
<p>DECRESE EL ENTRABAMIENTO DE LOS BLOQUES</p> <p>↓</p>	<p>INTACTA O MASIVA - Especímenes de roca intacta o masiva in-situ, roca con discontinuidades amplias y espaciadas</p>	90		N/A	N/A
	<p>FRACTURADA - Macizo rocoso con bloques entrelazados, consistente en bloques cúbicos formados por tres intersecciones de</p>	80	70		
	<p>MUY FRACTURADA - Macizo parcialmente perturbado con bloques entrelazados y angulares, formados por cuatro o más</p>	60	50		
	<p>FRACTURADA / PERTURBADA - Macizo rocoso plegado formado por bloques angulares formados por la intersección de varios</p>	40	30		
	<p>DESINTEGRADA - Macizo rocoso altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados, pobremente</p>	20			
	<p>FOLIADA / LAMINADA - Se carece de bloques debido débil material presente en los planos de foliación o de cizalla</p>	N/A	N/A		10

Tabla 7.-El color rojo representa el grado de fracturamiento, mientras que el verde la condición de la superficie, mediante estas dos evaluaciones se obtiene el GSI, Oyanguren (2004).

11.7.6 EFECTO DE LA EXCAVACIÓN Y LA INSTALACIÓN DEL SOPORTE DE LAS ROCAS

El mejor método de excavación es saber el diseño de la abertura, las condiciones del terreno, el tamaño, el tiempo de construcción y aspectos medioambientales. Los métodos de soporte de la roca están ligados al diseño de la excavación, en algunos casos se pone el apoyo al inicio y al final o solamente al inicio, todo esto para cumplir un requisito de durabilidad como se habló anteriormente en la aplicación de la geotecnia en minería.

11.8 MÉTODO DE EXCAVACIÓN

Cuando se planifica la excavación se toman en cuenta solo los esfuerzos iniciales, pero a medida que ésta avanza los esfuerzos van cambiando para adaptarse a las nuevas condiciones, lo que puede generar



grietas a lo largo de la periferia del túnel, todo dependiendo del tipo de roca que se tiene y del método utilizado. La voladura principalmente causa grietas en el macizo, así como el desplazamiento de las juntas ya existentes y una perturbación en las tensiones, pero el efecto de las explosiones depende en sí del diseño de la voladura, lo cual incluye: la cantidad de explosivo ocupado, las propiedades de la roca, la cantidad de agujeros detonados al mismo tiempo, así como la distancia entre ellos.

XII.- CRITERIOS DE RESISTENCIA Y COMPORTAMIENTO A LA FALLA DEL CONTINUO

1 2.1 ROTURA FRÁGIL DE LAS ROCAS

Adicionalmente, y para tener en claro la importancia del tipo de comportamiento en la roca, principalmente por efectos de su estructura, es importante conocer que en las rocas la rotura se puede ocasionar de diversas formas, lo cual depende del campo de esfuerzos al que esté impuesto, a las microfisuras que presente, a la porosidad de la roca y a zonas de debilidad en los minerales como el clivaje.

Dependiendo de la presión de confinamiento podemos tener un resultado diferente de rotura. Todo depende de los esfuerzos que se le apliquen: a) Compresión simple genera grietas en la misma dirección de la tensión. b) Con una presión de confinamiento pequeña se puede evitar el crecimiento de las microfisuras verticales por lo tanto se rompe de manera oblicua. c) Con presión de confinamiento relativamente grande tenemos una deformación pseudo-dúctil, con grandes deformaciones y muchas microfisuras (Véase Fig. 21)⁸⁷.

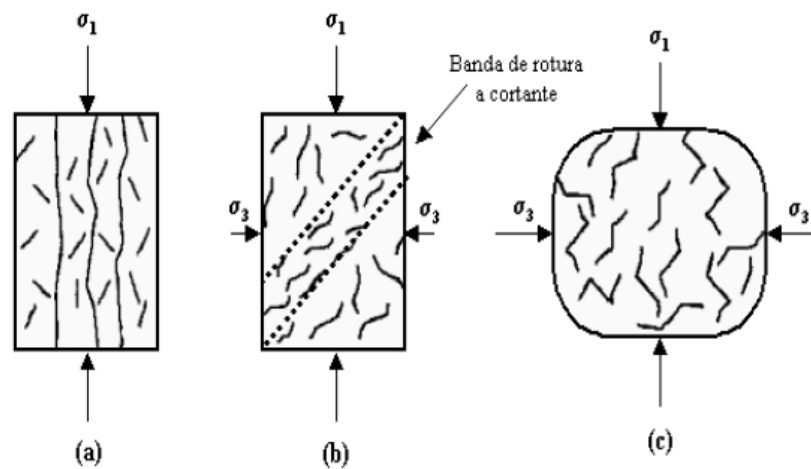


Figura 21.- Tipos de roturas de rocas sometidas a compresión.⁸⁸

En el caso de las rocas, las microfisuras se encuentran principalmente entre los cristales o granos minerales, se pueden dar diferentes tipos de coalescencia⁸⁹ entre ellas el primero es el tipo de escalón o “en echelon” que es cuando una microfisura se junta con otra, o cuando están más o menos paralelas y se juntan por la parte más cercana que sería el puente (Fig.22 a, b)⁹⁰.

⁸⁷ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁸⁸ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁸⁹ Posibilidad de que dos fracturas se junten por acción de los esfuerzos de sus partes más próximas.

⁹⁰ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

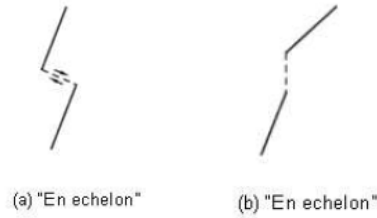


Figura 22.- Representación de coalescencia en echelon (dos variaciones)⁹¹

El siguiente mecanismo se llama Al pasar o “en passant”. Es cuando dos fracturas más o menos paralelas viniendo de zonas distintas se acercan y ya sea por tracción o por cortante se conectan (Fig.23 c, d)⁹².

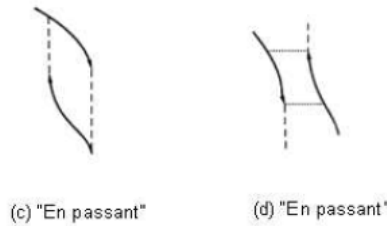


Figura 23.- Representación de coalescencia En passant (dos variaciones).⁹³

Por último, es la coalescencia poro-poro y poro-grieta donde por medio de grietas en las aristas se juntan poro y poro, y si es poro-grieta la grieta modifica su dirección de crecimiento y alcanza al poro (Fig.24 e, f)⁹⁴.

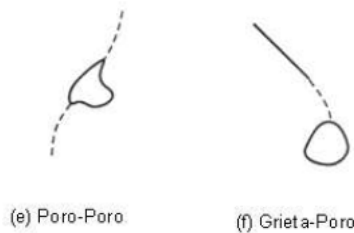


Figura 24.- Representación de la coalescencia Poro-Poro (e) y Grieta-Poro (f).⁹⁵

⁹¹ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁹² Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁹³ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁹⁴ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁹⁵ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.



Mediante los criterios de rotura es como se declaran los valores de las variables de resistencia las cuales definirán las tendencias de comportamiento. A continuación, se comentan los criterios de rotura más importantes.

1 2.2 CRITERIO DE ROTURA DE MOHR-COULOMB⁹⁶

Este criterio nos dice que la resistencia al corte de las rocas consta de dos componentes, la cohesión y la fricción, siendo esta última dependiente de la tensión efectiva normal sobre el plano de rotura.

La rotura se produce cuando la tensión cortante aplicada a la roca es igual a la resistencia friccional de la misma, asociada con la tensión normal en el plano de rotura, más la cohesión.

Con esto se creó una representación de los círculos de Mohr y la recta máxima ajustados a varios ensayos (Fig. 25):

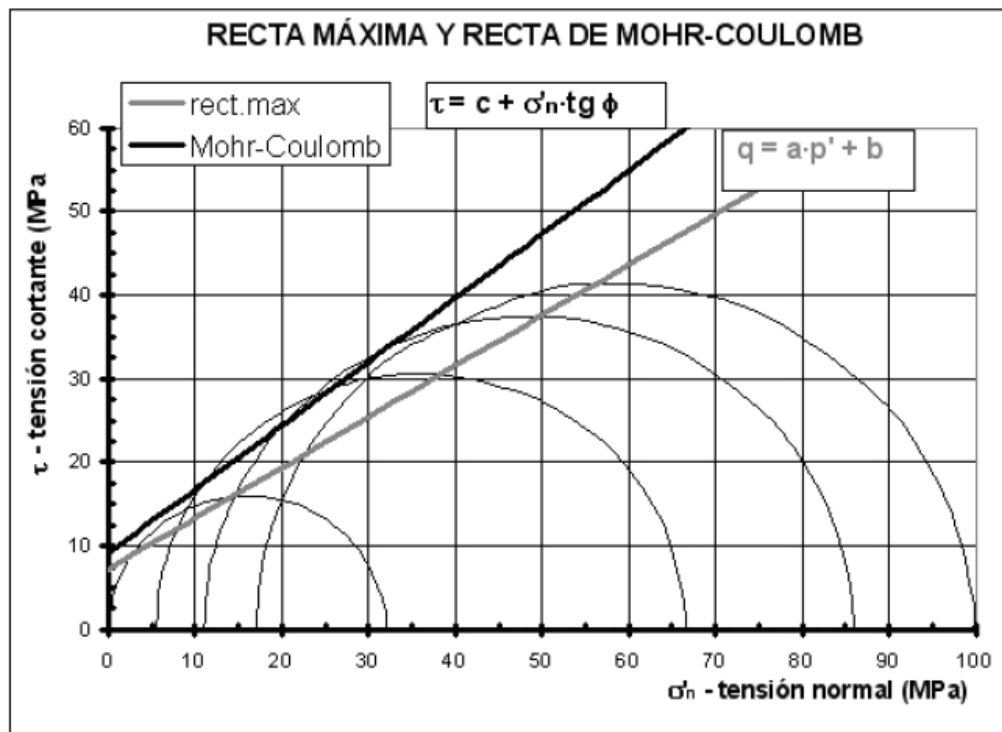


Figura 25.- Círculo de Mohr y recta ajustada a varios ensayos.

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb, introducido por primera vez por Coulomb en el año 1773, inicialmente pensado para el estudio en suelos, es un criterio de rotura lineal, lo cual significa, que la ecuación que define la superficie de fluencia es una ecuación lineal.

Aunque el comportamiento de la roca en un ensayo triaxial no concuerda con un modelo lineal, Mohr-Coulomb se sigue utilizando mucho por su sencillez y comodidad.

En la actualidad los criterios en que se basan las roturas son:

⁹⁶ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.



- Del esfuerzo principal máximo.
- Del esfuerzo máximo cortante desarrollado.
- De la deformación principal máxima.
- De la deformación máxima de energía desarrollada.

Para utilizar los criterios de rotura de Mohr-Coulomb hay que saber qué es lo que se requiere. De la teoría de Coulomb se obtienen estas figuras:

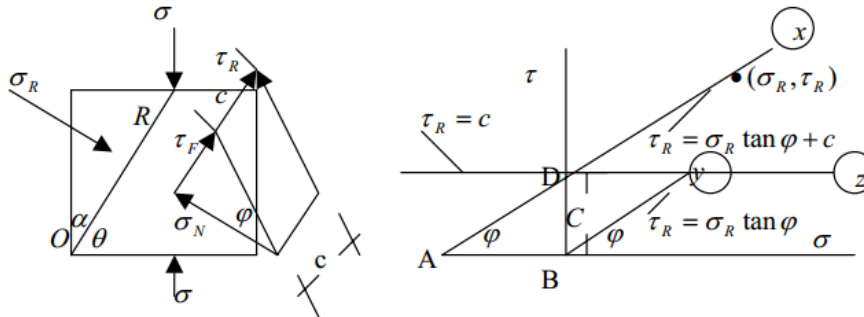


Figura 26.- Representaciones gráficas de las ecuaciones en el círculo de Mohr.

“Se entiende por cohesión la resistencia que ofrecen las partículas más pequeñas de los materiales sólidos a los intentos, por parte de los esfuerzos externos a que son sometidos, de variar las distancias que están forzadas a mantener en ausencia de tales esfuerzos”.

Según Coulomb (1736-1806), en un material sólido cohesivo que está en equilibrio bajo la acción de esfuerzos externos σ , como se muestra en la fig. 23, se cumple:

$$\sigma N = \sigma R \quad (1); \quad \tau F = \sigma N \tan \phi = \sigma R \tan \phi \quad (2); \quad c \tau R = \tau F \quad (3)$$

$$\text{Reemplazando (2) en (3), se obtiene; } c \tau R = \sigma R \tan \phi \quad (4)$$

En donde: $R \tau$ es el esfuerzo cortante que se genera en el plano de falla (OR); σR es el esfuerzo normal al plano de falla; ϕ es el ángulo de fricción interna del material y c es su cohesión.

Estas dos últimas son las propiedades intrínsecas

La ecuación (3) define el equilibrio del material cohesivo bajo los esfuerzos externos a que es sometido. También se ve en la Fig. 26 que el plano de falla OR forma un ángulo θ con el plano sobre el cual actúa el esfuerzo externo σ , que llamaremos ángulo de falla y otro α con el plano normal a aquél, que es el complemento de θ .

Para materiales granulares

Se pueden calificar como tales a aquellos materiales que han sido sometidos a fragmentación por cualquier medio mecánico, térmico, sísmico o de cualquiera otra naturaleza y que por efecto del quebrantamiento hayan perdido su cohesión.

En este caso la ecuación (4) se transforma en:

$$\tau_R = \sigma_R \tan \phi, \text{ de donde: } \frac{\sigma_R}{\tau_R} = \tan \phi \quad (5)$$

Ecuación que define el equilibrio de una masa de material granular o quebrantado y solo se mantiene en ese estado gracias a la acción de su coeficiente de fricción interna, que se conserva invariable para el estado cohesivo o el granular.

Para materiales sin coeficiente de fricción interna.

En esta categoría entran los líquidos y los gases y la ecuación (4) se transforma en:

$$c\tau R \quad (6)$$

A las representaciones gráficas de las ecuaciones (4), (5) y (6), que se ilustran en la fig. 26, como (x), (y) y (z), se les puede denominar curvas de resistencia, ya que expresan la Resistencia que el material opone a cualquier estado de esfuerzos a que sea sometido. También se les puede llamar curvas de rotura, ya que indican el límite a partir del cual el material falla o curvas características, puesto que identifican y distinguen a cada material de los demás.

De la teoría de Mohr

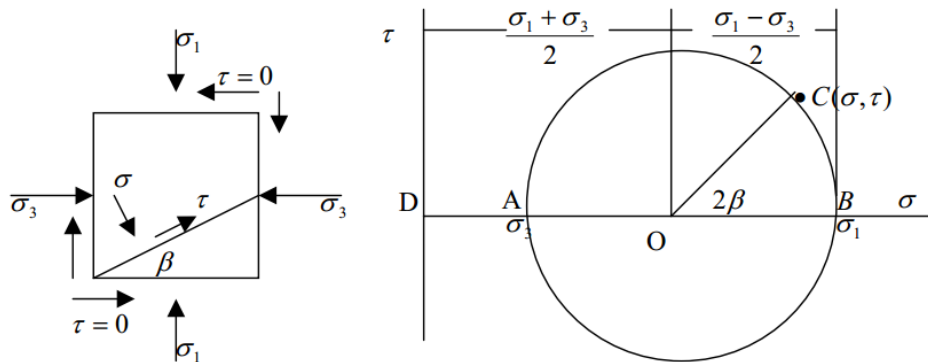


Fig. 27 Izq. Representación de esfuerzo sigma 1(principal) y sigma 3 secundario en interacción con bloque. Derecha círculo de Mohr donde se aprecia a sigma 1 como un máximo y a sigma 3 como un mínimo.

Según MOHR (1835-1918), cuando un punto de un material es sometido a un estado planar de esfuerzos, existen en su interior dos planos ortogonales sobre los cuales los esfuerzos cortantes que actúan sobre ellos son nulos y los esfuerzos normales son: un máximo, σ_1 , y un mínimo, σ_3 , como se muestra en la fig. 27.

En función de tales esfuerzos máximo y mínimo, los esfuerzos normal y cortante que actúan sobre un plano cualquiera del punto.

Los esfuerzos que se originan en todos los planos que pasan por el punto se pueden representar en un círculo, conocido como Círculo de Mohr, en su honor, tal como aparece en la fig. 27, en la que:

- OB es el plano principal mayor, sobre el cual actúa σ_1 .
- OA es el plano principal menor, sobre el cual actúa σ_3 .
- OC es un plano cualquiera sobre el cual actúa un esfuerzo normal, σ , y un esfuerzo cortante, τ .

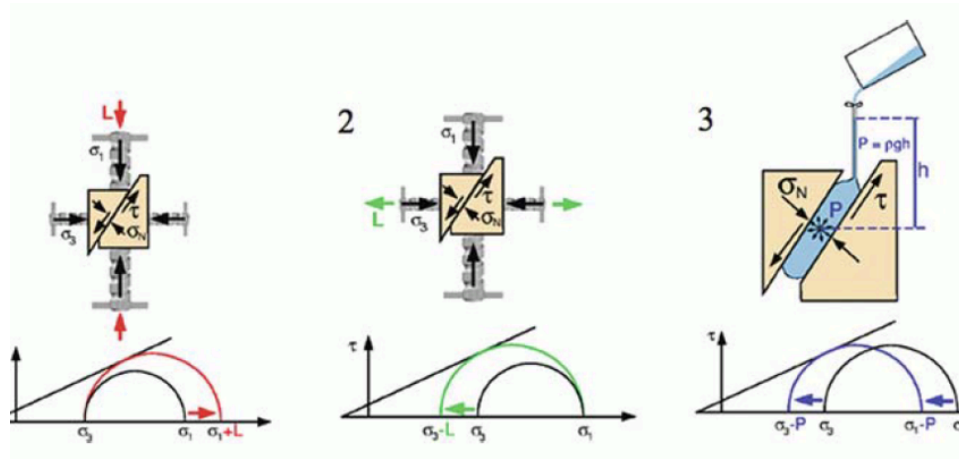


Fig. 28 Formas de disparar una falla con Mohr Coulomb

Tres formas de disparar una falla (cuando el semicírculo toca la recta envolvente) según el criterio de rotura de mohr-coulomb (Figura 28):

1. Aumentando la presión principal σ_1
2. Disminuyendo la presión de confinamiento σ_3
3. Aumentando la presión de fluidos P que reduce la presión efectiva σ_1 y la σ_3

Hay dos formas de aumentar la presión de poros (caso 3) natural por lluvias y tecnológica: pantanos e inyecciones de fluidos en las rocas. En todos los casos, las fallas se disparan y provocan sismicidad⁹⁷.

1 2.3 CRITERIOS DE ROTURA DE HOEK-BROWN⁹⁸

Este fue propuesto inicialmente para ser utilizado en excavaciones subterráneas en macizos rocosos resistentes, las propiedades que se incluyen en este criterio son: resistencia a la compresión simple y la constante de material rocoso, pero cuando se trata de macizos rocosos en lugar de rocas se tienen que añadir más parámetros. Cuando se está estudiando una probeta podemos establecer un límite con cierta libertad, en cambio cuando se habla de un macizo rocoso que ya tienen una obra de ingeniería se tienen que tomar en cuenta las tensiones existentes en la obra.

Este criterio de rotura se desarrolló partiendo de las propiedades de la roca intacta y entonces se introducían factores reductores de esta propiedad para las características de una roca dclasada. Para esto se utilizó el sistema de clasificación de macizos rocosos RMR (Rock Mass Rating).

Debido a la ausencia de alternativas, este criterio fue aceptado por la comunidad de mecánica de rocas, y consecuentemente éste llegó a ser reexaminado y se introdujeron nuevos elementos cada vez que era

⁹⁷ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.

⁹⁸ Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.



aplicado a un amplio rango de proyectos prácticos. Producto de estas modificaciones fue la introducción de los macizos rocosos alterados e inalterados de Hoek y Brown.

Las primeras dificultades que aparecen en muchos problemas geotécnicos, particularmente en la estabilidad de taludes es más conveniente tratarlos con el criterio original de Hoek Brown en términos de esfuerzos normales y al corte más que en término de esfuerzos principales:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5}$$

Donde: σ'_1 y σ'_3 son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de rotura
 σ_{ci} es la resistencia a compresión uniaxial del material intacto
 m y s son las constantes del material, donde $s = 1$ para roca intacta.

Otra cosa que se modificó fue que el RMR resulto no adecuado para relacionar este criterio con las observaciones en campo, muy en específico con los macizos rocosos débiles, a lo que condujo al Índice de Resistencia Geológica o en siglas GSI (Geological Strength Index).

Ecuaciones del Criterio de Hoek-Brown

Se expresa como:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde m_b es un valor reducido de la constante del material m_i y se da por:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

s y a son constantes del macizo rocozo dadas por las siguientes ecuaciones:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right), \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

D es un factor que depende sobre todo del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos *in situ* inalterados hasta 2 para macizos rocosos muy alterados.

Hoek mostró mediante una serie de cálculos que, para materiales frágiles, la resistencia a tracción uniaxial es igual a la resistencia a tracción biaxial.



XIII.- ANÁLISIS NUMÉRICO Y GEOTECNIA

El análisis numérico es parte esencial de la geotecnia de excavación, ya que mediante el entendimiento del lenguaje abstracto que se ha desarrollado a lo largo del tiempo, se realiza la identificación de variables que proporcionan el comportamiento del ambiente donde se desarrolla el proyecto y esto es definido cuantitativamente mediante el uso de iteraciones con lo cual se puede llegar a un resultado confiable.

Esto quiere decir que para tener certeza del comportamiento de cualquier sistema se requiere de mediciones.

Los métodos numéricos se componen de pasos finitos que van mejorando hasta que se cumple un rango de error. Este cálculo cíclico es llamado iteración. Estos métodos se usan para realizar un modelo matemático y estos son una representación matemática de la realidad, el cual nos proporciona datos específicos de la respuesta de un medio ante la modificación de sus condiciones, en las cuales se encuentra en equilibrio, lo que nos da la capacidad de realizar predicciones basadas en los parámetros y datos usados.

Conforme a García (et. al., 2016) “Dado que los modelos están basados en la lógica matemática es necesaria una adecuación del cálculo del sistema que se esté evaluando. Sistemas diferentes se comportan de manera diferente, realizar un modelo matemático implica saber exactamente qué propiedades del medio que estemos evaluando nos interesa medir, la complejidad de un modelo está, primeramente, en función del comportamiento del sistema y después en función de lo que el usuario quiera conocer de él.”

Conforme a Hawking y Mlodinow (2010) un modelo es satisfactorio si cumple con las siguientes características:

- Es simple.
- Contiene pocos elementos arbitrarios o ajustables.
- Concuerta con las observaciones existentes y proporciona una explicación de éstas.
- Realiza predicciones detalladas sobre observaciones futuras, las cuales permitirán refutar o validar el modelo si se cumplen o no.

Los modelos numéricos se derivan de las ecuaciones diferenciales, estas se dividen en parciales u ordinarias y para llegar a una solución se requiere de métodos numéricos y/o analíticos; los primeros se utilizan debido a la complejidad de los problemas ya que haciéndolo de manera analítica serían prácticamente imposibles de resolver.

Los modelos numéricos son importantes de acuerdo con Regalado (et. al., 2006) porque nos proporcionan detalles que no son evidentes a simple vista, nos dan un panorama entre la relación que



hay con las propiedades y características, y para tener un marco de referencia cuando no es posible interactuar con la realidad, lo que permite la toma de decisiones tomando al modelo en consideración. Los métodos numéricos son divididos entre métodos de límite o frontera y los de dominio, el primero divide la excavación en elementos y el interior del macizo rocoso lo toma como continuo. Los métodos límite se dividen en continuos y discontinuos según Scheldt (2002), los primeros son evaluados de manera directa o indirecta mientras que los segundos son evaluados en función del desplazamiento de las discontinuidades (García, 2016).

El método de dominio divide el interior del macizo rocoso en elementos geométricos simples y a esto se le asignan determinadas propiedades, e igualmente se dividen en continuos y discontinuos.

Para los métodos continuos su evaluación puede hacerse mediante el *elemento finito con diferencias finitas* según García (2016). En cambio, los métodos discontinuos son evaluados mediante *elementos discretos o distintos* (Scheldt, 2002).

1 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS NUMÉRICOS

Los métodos límite trabajan con materiales que tienen un comportamiento elástico, el número de materiales con el que operan es limitado, el análisis es cuasi-estático (García, 2016). Este método se utiliza de manera eficiente con los problemas bidimensionales mientras que con los problemas tridimensionales debido a las matrices generadas que da el programa requieren de mayor tiempo (Scheldt, 2002).

Los métodos de dominio pueden trabajar con materiales cuyo comportamiento no es lineal, consideran múltiples tipos de materiales, así como el análisis cuasi-elásticos o dinámicos y además los mimitos que se refieren a la ubicación y condiciones del sistema son determinados por el usuario (García, 2016).

“Dentro del método de dominio, el de diferencias finitas opera mediante sustituir los derivativos característicos del sistema en la ecuación o ecuaciones diferenciales que definan el medio, mediante una diferencia de aproximaciones finitas, lo cual resulta en un gran sistema de ecuaciones algebraicas, expresadas en términos de cantidades de campo” (García, 2016) como son esfuerzos y desplazamientos que pueden ser resueltas en lugar de las ecuaciones diferenciales (LeVeque, 2006).

El método de diferencias finitas se utiliza especialmente para realizar una aproximación en las ecuaciones parciales, esto está basado en el concepto de *problema variacional* (se basa en encontrar máximos y mínimos).

1 3.2 TIPOS DE PROBLEMAS

El análisis numérico puede resolver diferentes problemas, los cuales se pueden clasificar:

- Según su dimensión

- Problemas de dimensión finita: son aquellos en que su solución es un conjunto finito de números.
- Problemas de dimensión infinita: son aquellos en lo que en su planteamiento intervienen elementos descritos por una cantidad infinita de números.
- Según su naturaleza:
 - Problemas que no poseen solución analítica.
 - Problemas que poseen solución analítica, pero esta no puede aplicarse de forma sencilla.
 - Métodos sencillos de solución que requieren una excesiva cantidad de cálculos.

1 3.3 ÁREAS DE ESTUDIO DEL ANÁLISIS NUMÉRICO.

- Cálculo de los valores de una función.
- Interpolación, extrapolación y regresión.
- Solución de ecuaciones y sistemas de ecuaciones.
- Solución de ecuaciones lineales: métodos directos y métodos iterativos.
- Ecuaciones no lineales.
- Descomposición espectral y en valores singulares.

Optimización: búsqueda de valores máximos y mínimos integrando restricciones.

Integración numérica: se divide el intervalo de integración en sub-intervalos y se calculan integrales en cada uno de ellos.

Ecuaciones diferenciales: soluciones aproximadas. Se basan en la discretización de las ecuaciones diferenciales.

Hay que recalcar que estos análisis se basan en las leyes constitutivas y tienen como modelo de solución (Figura 29):

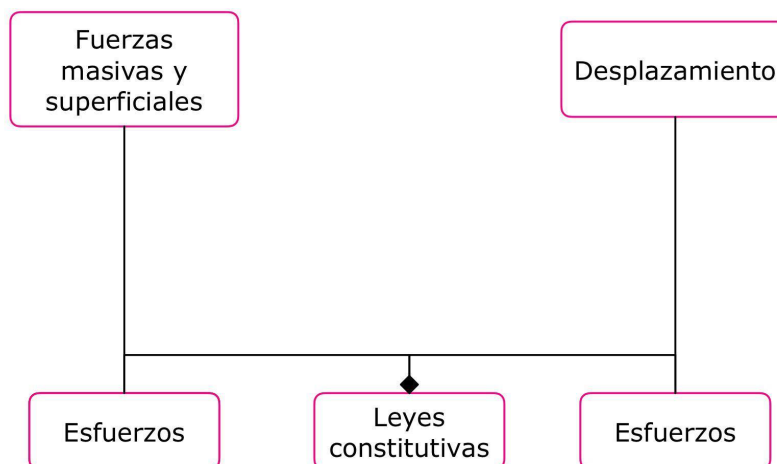


Figura 29.- Representación gráfica de la aplicación del análisis numérico en la geotecnia.



Podemos decir que en los diferentes métodos hay más similitudes que diferencias como se observa en la tabla 8:

Método	MEF	MDF	MEC	MED
Ámbito de aplicación	Análisis lineales y no-lineales. Materiales no homogéneos y moderadamente fisurados.	Análisis lineales y no-lineales. Materiales no homogéneos y moderadamente fisurados. Especialmente indicado para análisis muy no-lineales, transitorios y grandes deformaciones.	Análisis lineales. Materiales homogéneos con pocas fracturas.	Análisis no-lineales. Materiales heterogéneos altamente fisurados.

Tabla 8.- Comparativa entre los diversos métodos numéricos.



XIV.- EJEMPLOS

Es importante ver la aplicación de aquello que se habló en el transcurso de este escrito, principalmente porque es importante para un ingeniero el poder visualizar el alcance de los conocimientos que va adquiriendo.

Los ejemplos que se representan en este trabajo fueron obtenidos de diversas fuentes, al terminar de explicar cada uno de ellos se pondrá el lugar de donde se sacó y sus respectivos autores.

1 4.1 EJEMPLO 1 PROYECTO JONGOS

BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El Proyecto Jongos pondrá en operación una mina no metálica a tajo abierto para explotar calizas con alta y baja ley de óxido de calcio. Geográficamente se localiza en las coordenadas UTM 9 102 000 N y 194 000 E.

La explotación de este tajo tendrá como objetivo la extracción de caliza, para la fabricación de cal y Cemento Tipo I, para lo cual se proyecta la instalación de una planta industrial que se ubicará muy cerca de la zona de interés.

EL EJEMPLO DE APLICACIÓN ESTÁ CONFORMADO POR DOS PARTES.

La primera parte consiste en el diseño de taludes de un tajo abierto basado en la proyección estereográfica, las características geomecánicas del medio las condiciones climáticas, así como la topografía presente.

Posteriormente, en una segunda parte, se abordará el análisis numérico de los taludes diseñados teniendo en cuenta el fracturamiento del macizo rocoso mediante la técnica J-MEF.

En la primera mitad se analiza la litología del lugar, así como las formaciones presentes y sus características, el clima predominante, la topografía y la geología estructural.

CLIMA

La zona de estudio se caracteriza por presentar dos estaciones bien definidas: una estación lluviosa de noviembre a abril con precipitaciones y un nivel alto de humedad; y una estación seca, de mayo a octubre, con temperaturas bajas y sequedad durante el día.

TOPOGRAFÍA

La topografía de la zona donde se ubicará el tajo se presenta en laderas estratificadas de calizas y quebradas, las pendientes son menores de 65° , aunque en algunos casos se presenta pendientes verticales.

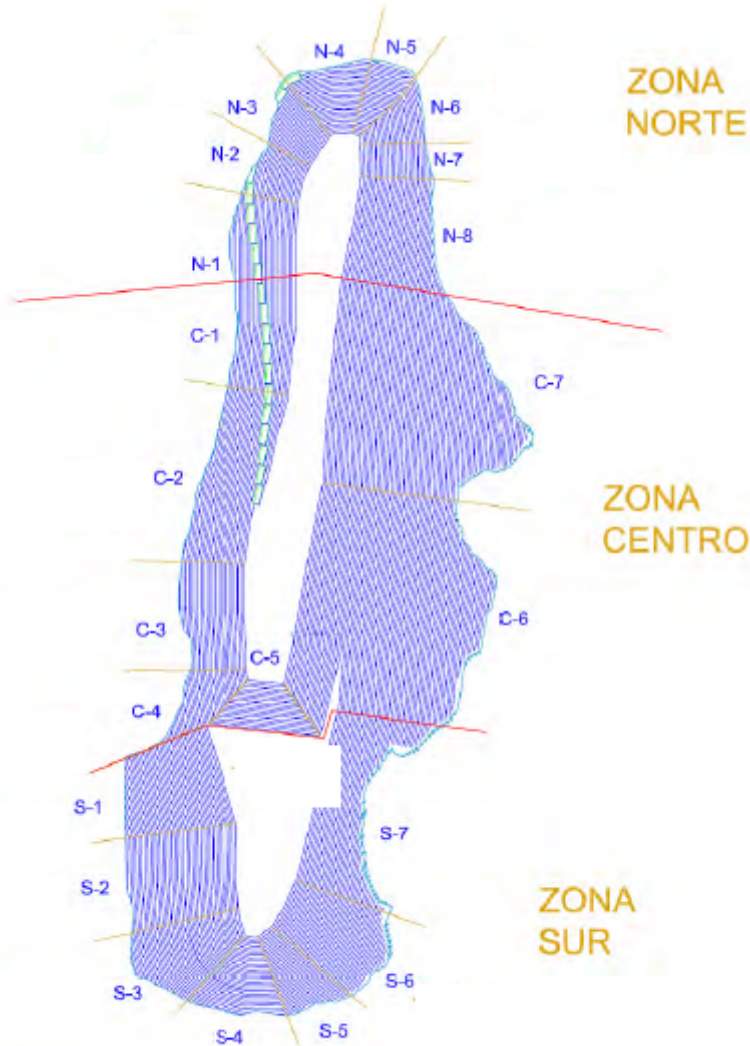


Imagen 1E.- División de dominios para análisis del tajo.

En la zona del proyecto se manejan las siguientes formaciones:

Formación Chicaza (Jurásico Superior): que consta de Areniscas, limolitas que se intercalan con limoarcillas y lutitas y lutitas ferruginosas y carbonosas.

Formación Chimú (Cretácico Inferior): constituida de cuarcitas de grano medio con una intercalación de limolitas delgada, con presencia de ligero plegamiento de alrededor de $10^\circ - 15^\circ$ WE.

Formación Ferrat (Cretácico Inferior): Secuencia clástica de areniscas y cuarcitas.
Formación Pariahuanca, Chulec, Paritambo (Cretácico Medio- Superior): Secuencia de caliza micrítica con vetillas y venas de calcita blanca, se encontró en dicha secuencia la presencia de diques intrusivos de composición andesítica con textura porfidítica.

Formación Jumasha, Celendín (Cretácico Superior): Constituida por caliza gris claro

con presencia moderada de fósiles.

Igualmente, para obtener la recolección de información geomecánica se obtuvieron varios núcleos para realizar un logueo de la zona y así poder obtener información sobre la competencia del macizo, su grado de fracturamiento, tipos y condición de fracturas y su calidad geomecánica.

Para el tema estructural, la información se obtuvo mediante los núcleos de roca recuperados y el mapeo geológico de la zona, estos se analizaron mediante el análisis estereográfico con ayuda del software Dips



5.1 de Rocscience. Para la realización de estos análisis, así como para la perforación del lugar se dividió en tres zonas, la norte, la central y la sur como se ve en la imagen 1E.

Los estereogramas se dividieron conforme a lo datos de las estructuras recabados mediante la perforación que dan información sobre la orientación y características de las fracturas y los datos superficiales que proporciona la longitud de la fractura, así como su espaciamiento, de estos datos solamente se graficaron los polos de las fallas o fracturas (Imagen 2E).

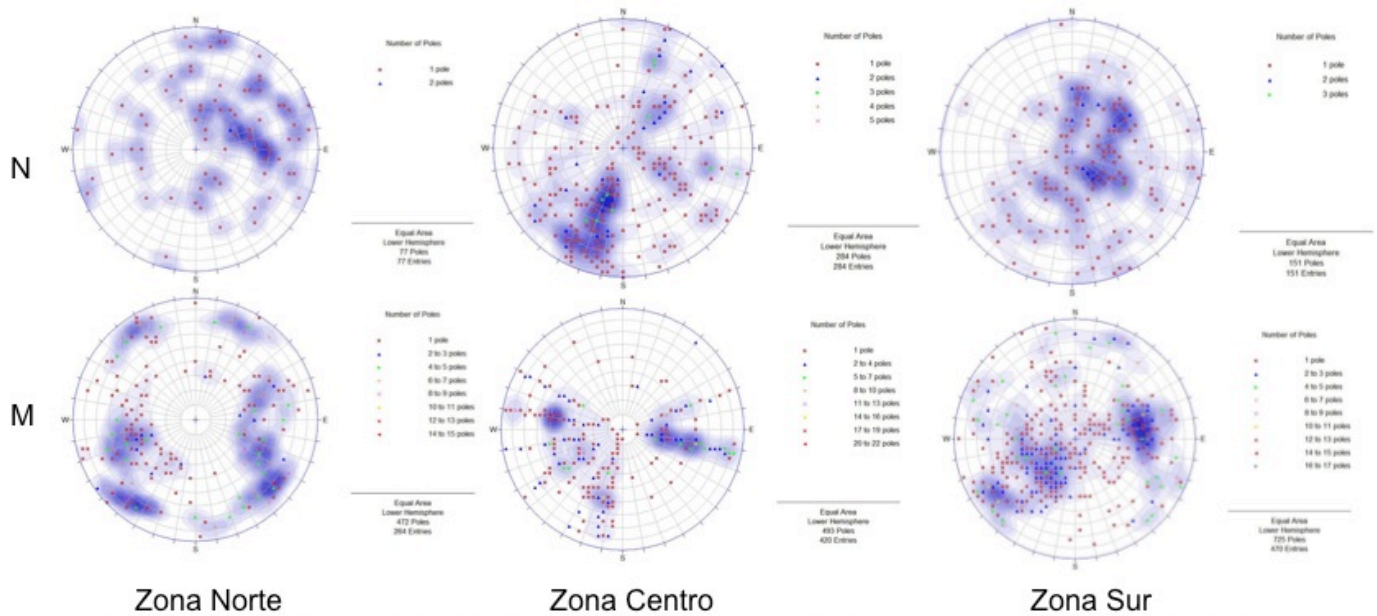


Imagen 2E.- Estereogramas donde se identifican las familias de discontinuidades.

Posteriormente mediante la combinación de los dos tipos de estereogramas anteriores se definieron los dominios estructurales por zonas (Imagen 3E, A), a continuación, con la identificación de los dominios estructurales se definen las familias de discontinuidades mediante un polo representativo (Imagen 3E, B), y conforme a la intersección de las discontinuidades de identificaron las cuñas potenciales esto mediante la intersección de los planos de fracturas (véase Imagen 10 C).

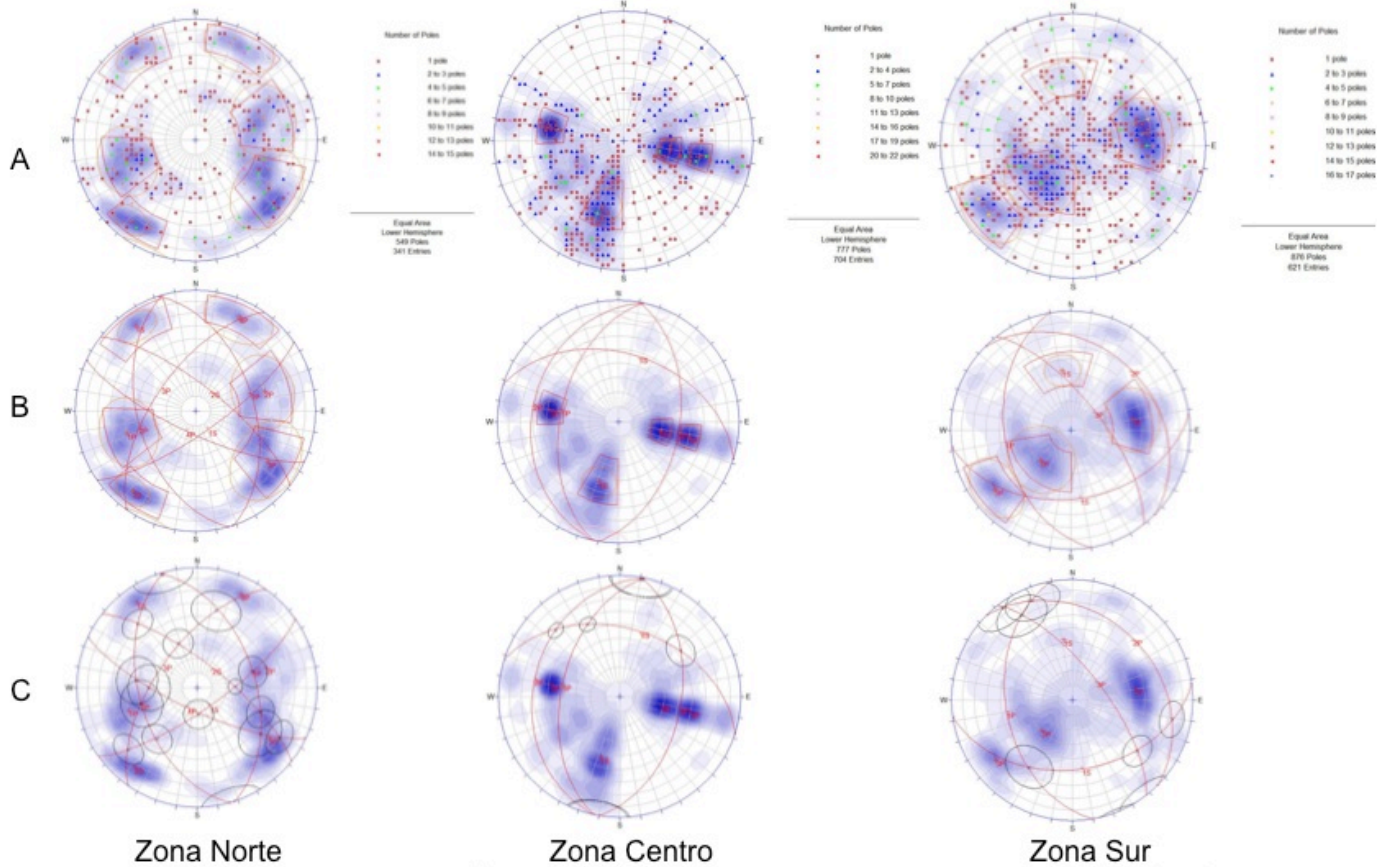


Imagen 3E.- Estereogramas Superiores (A) se identifican dominios estructurales. Estereogramas centrales (B) se identifican familias de discontinuidades y los estereogramas inferiores (C) representan cuñas potenciales.

EVALUACIÓN GEOMECÁNICA Y ESTRUCTURAL

Propiedades geomecánicas de los dominios estructurales

Los valores promedio de RQD, dureza (R), condición de fracturas (CF) y RMR fueron obtenidos mediante el logeo de los núcleos obtenidos mediante barrenación, a continuación, se observa la tabla obtenida mediante esos resultados:

Dominio Geomecánico	Valores Promedio			
	RQD (%)	R	CF	RMR
Sur	70	3.5	20	60
Centro	70	2.5	17	50
Norte	65	3.2	20	60

Tabla E1.- Valores promedio de RQD,R, CF y RMR para dominios geomecánicos (Pozo G., 2014).

Para obtener los parametros de resistencia del macizo rocoso y las discontinuidades de cada zona se estima el GSI mediante la carta de estimación de Hoek y Brown (1997).

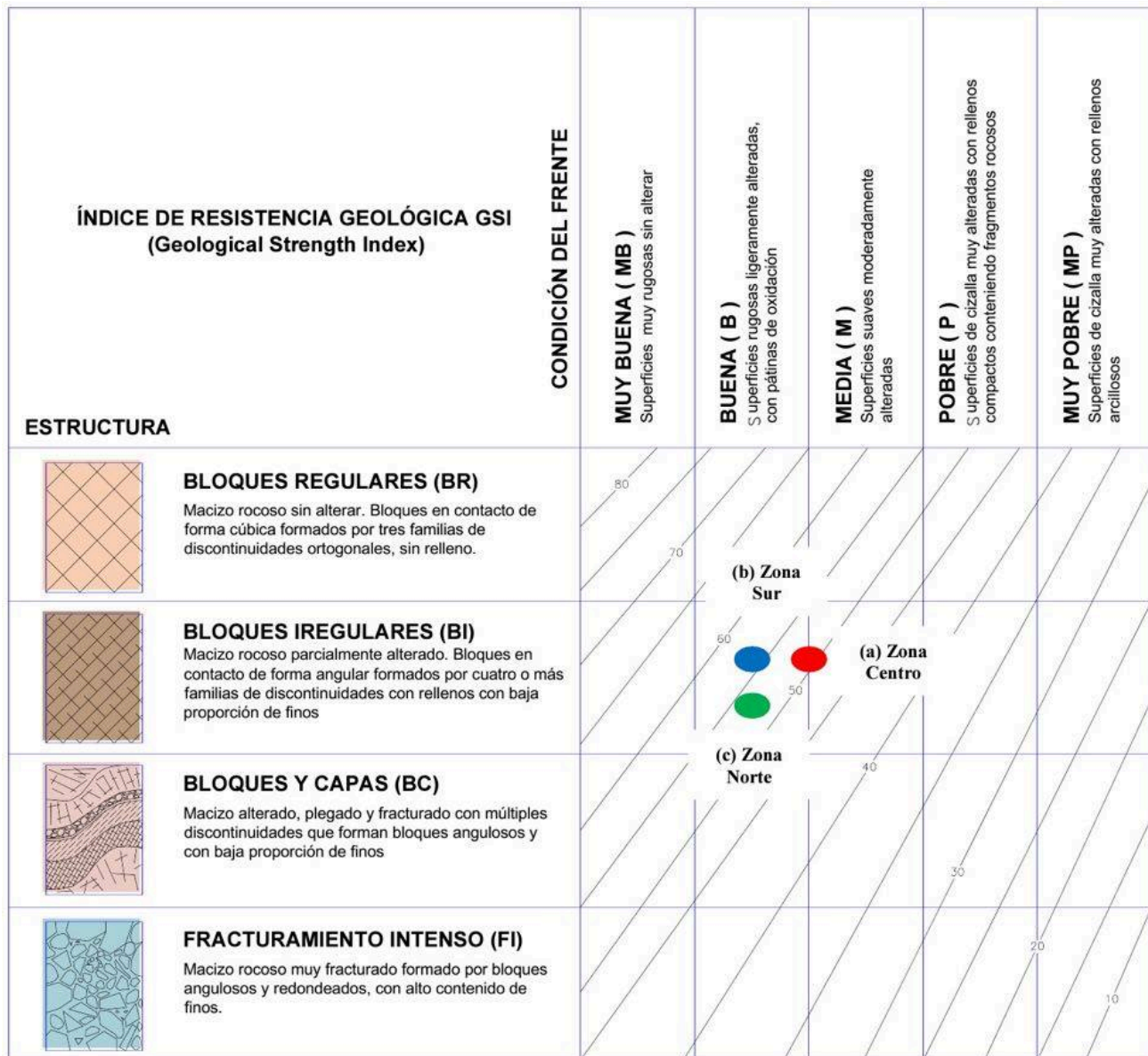


Figura E1.- Cálculo de GSI para cada dominio geomecánico.

CONDICIONES DEL ANÁLISIS

En la condición de análisis se habla acerca de la estimación de parámetros de resistencia y deformación del macizo, y posteriormente mediante los datos proporcionados anteriormente y mediante la estimación de parámetros que se realizará en los siguientes párrafos se creará un análisis de verificación de estabilidad de taludes. Éste se realizará de manera gradual, hasta llegar a la estimación requerida; todo esto obviamente basándonos en el factor de seguridad que requiere la obra.

El software que se utilizó para la realización del modelo es el Phase v 7.0 (Rocscience, 2012), en el que el método de análisis en el que se trabajó fue el de elementos finitos con representación explícita de los



planos de las discontinuidades (J-MEF), el cual se utilizó conjuntamente con el análisis de reducción de los parámetros de resistencia al corte (SSR), todo esto con la finalidad de saber el factor de seguridad mediante al análisis numérico.

El modelo constitutivo que se eligió para la modelación fue elasto-plástico con reblandecimiento, esto se refiere a la consideración de variación de a capacidad resistente después de que se haya presentado la plastificación, el criterio utilizado fue el generalizado de Hoek y Brown (Hoek, E., et al., 2002), e igualmente se consideran los parámetros residuales de acuerdo a la calidad geomecánica del macizo.

Se restringieron los movimientos de la frontera inferior y laterales del modelo y no se consideraron la presencia del nivel freático, ni condiciones pseudo-estática. Para el cálculo de elementos finitos se hicieron mediante triángulos de seis nodos, las iteraciones realizadas para este modelo fueron 500.

El análisis que se realizará es de falla plana se toma una tolerancia de 0.001, la relación entre las tensiones horizontal y vertical es de $K_0=1$. Para obtener una mayor aproximación el modelo se realizó en ocho etapas, empezando la primera fase con las condiciones normales sin excavación por consiguiente la ultima es cuando la excavación ha finalizado. La ley de fluencia se optó por la no asociada considerando la dilatancia nula. Para el módulo de deformación y coeficiente de Poisson se toma el recomendado por Hoek que es $\nu=0.25$

Para las discontinuidades se consideraron con un ángulo de fricción de 33° y cohesión nula, en la parte de los extremos de éstas se encuentran en condición de “abiertas”.

Se considera un factor de seguridad mínimo de 1.3 para garantizar la estabilidad en condiciones estáticas. Para saber el mecanismo de rotura mediante el cual al fallar se obtiene mediante los desplazamientos totales del programa que se utilizará.

ANÁLISIS DE LA ROTURA PLANA

El propósito en sí, es saber la variación del mecanismo de rotura que presenta la excavación con respecto a la altura del talud, por consiguiente, dado que la modelación se hará por etapas se analizarán para 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 y 64 bancos que en sí es la excavación final.

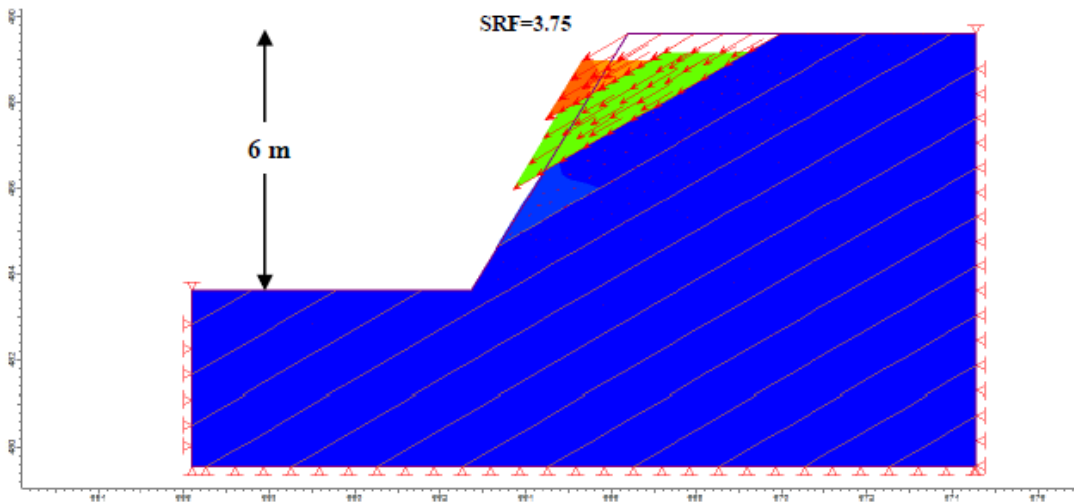


Imagen 4E.- Análisis de rotura plana (desplazamientos totales) para un banco.

Cuando se ha excavado solamente un banco se puede ver que tenemos un deslizamiento que está gobernado conforme a las discontinuidades presentes y es principalmente de la zona que tiene menos superficie para sostenerse y puesto que se le retira el pie, los bloques se deslizan.

Conforme la altura del talud es incrementada, el factor de seguridad disminuye, aunque el talud sigue siendo estable.

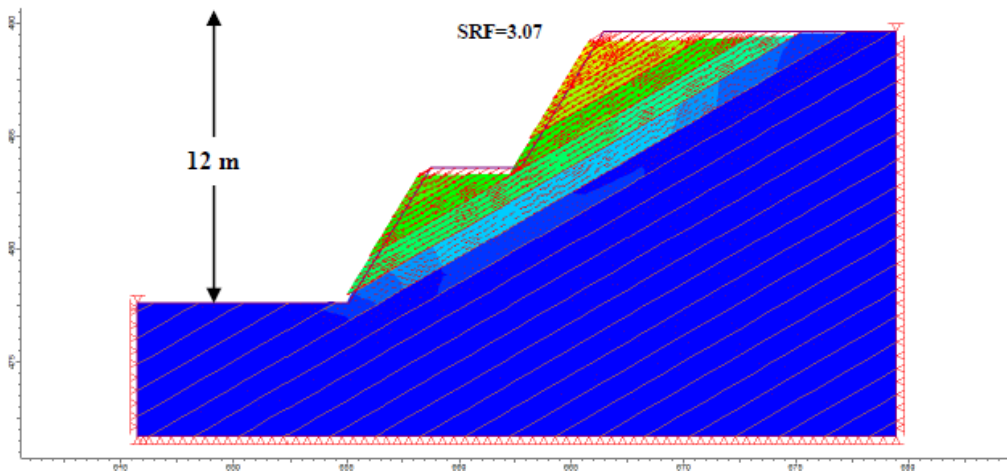


Imagen 5E.- Análisis de rotura plana (desplazamientos totales) para dos bancos.

Conforme la altura del talud va en aumento las probabilidades de rotura aumentan por lo tanto el factor de seguridad baja. En la imagen 5E se aprecia que sí hay un ligero movimiento, en sí el talud no colapsa pero se recomienda ponerle algún método de sostenimiento como anclas para que si existe algún otro factor que no se esté tomando en cuenta, aún así se mantenga estable. A continuación se ve como al

aumentar la altura y el número de bancos los desplazamientos totales se hacen más presentes e igualmente sigue habiendo debilidad conforme a las discontinuidades presentes.

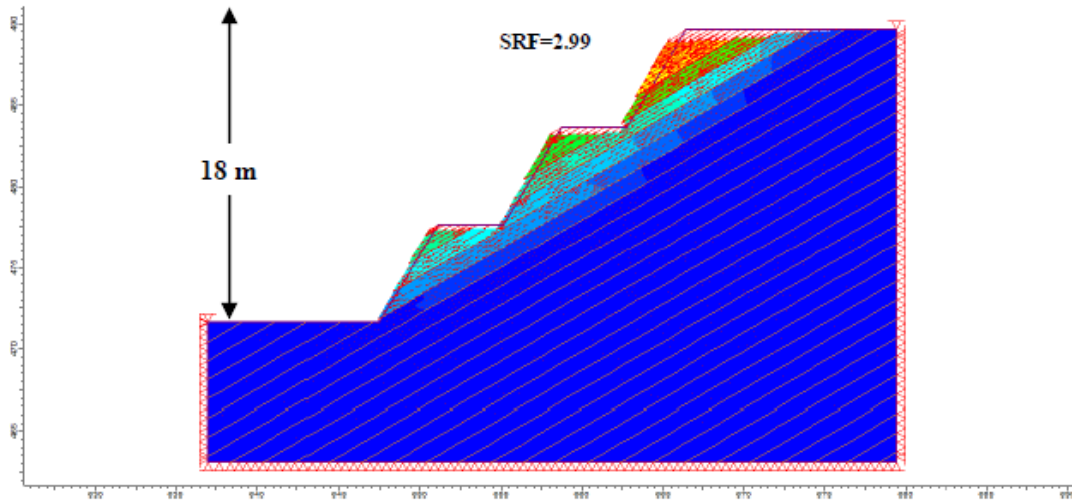


Imagen 6E.- Análisis de rotura plana (desplazamientos totales) para 3 bancos.

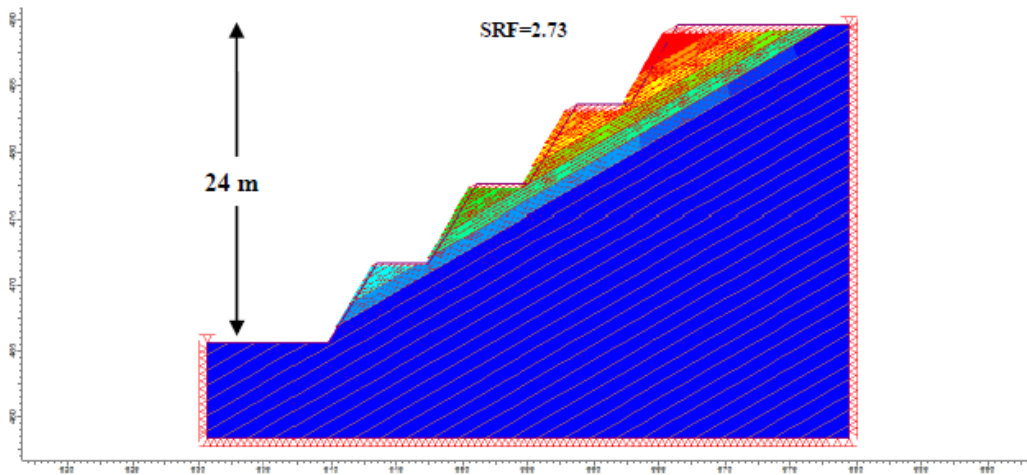


Imagen 7E.- Análisis de rotura plana (desplazamientos totales) para 4 bancos.

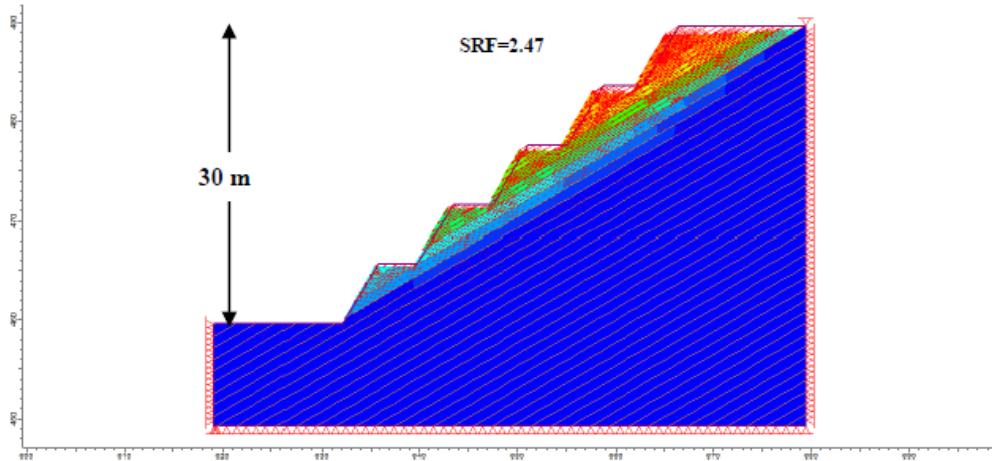


Imagen 8E.- Análisis de rotura plana (desplazamientos totales) para 5 bancos.

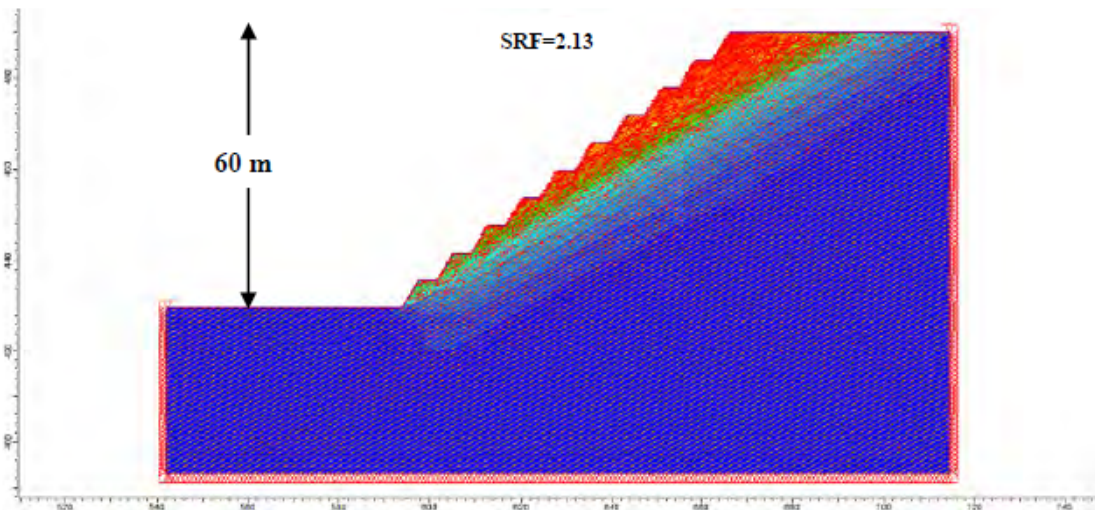


Imagen 9E.- Análisis de rotura plana (desplazamientos totales) para 10 bancos.

Conforme se va incrementando la profundidad de la excavación los mecanismos de rotura empiezan a ser más complejos, como se puede observar cuando se excavan 20 bancos, la rotura que se produce es una combinación entre el deslizamiento a través de las discontinuidades y mediante el corte a través de los bloques de roca intacta como se ve en la imagen 10E, por consiguiente, el factor de seguridad disminuye más y se presenta un mecanismo de rotura nuevo.

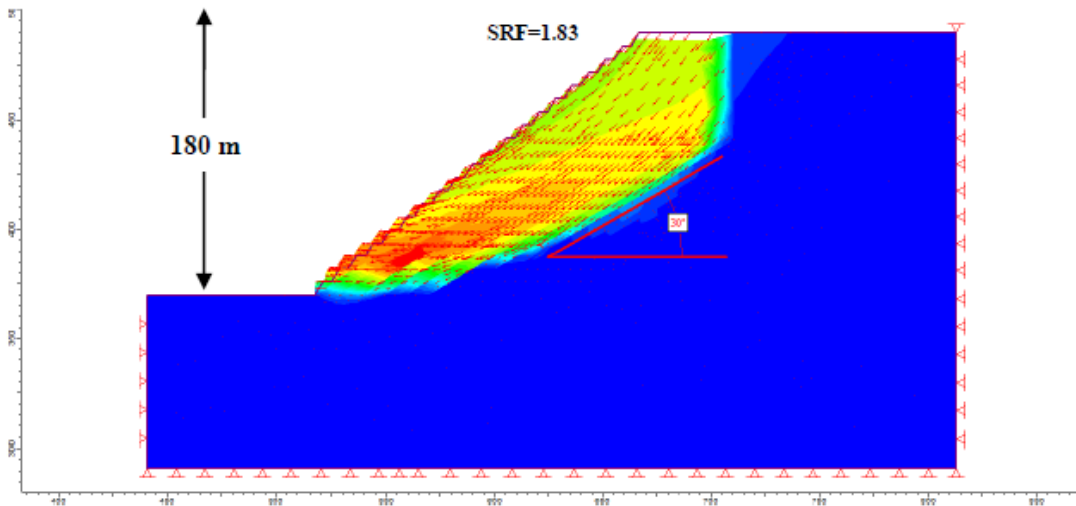


Imagen 10E.- Análisis de rotura plana (desplazamientos totales) para 20 bancos.

En la Imagen 11E se presentan las deformaciones máximas por tensiones de corte en el macizo rocoso, y se puede observar cómo la rotura empieza desde la parte superior hasta el pie del talud y en el inter entre el principio y el fin progresa siguiendo el buzamiento de las discontinuidades.

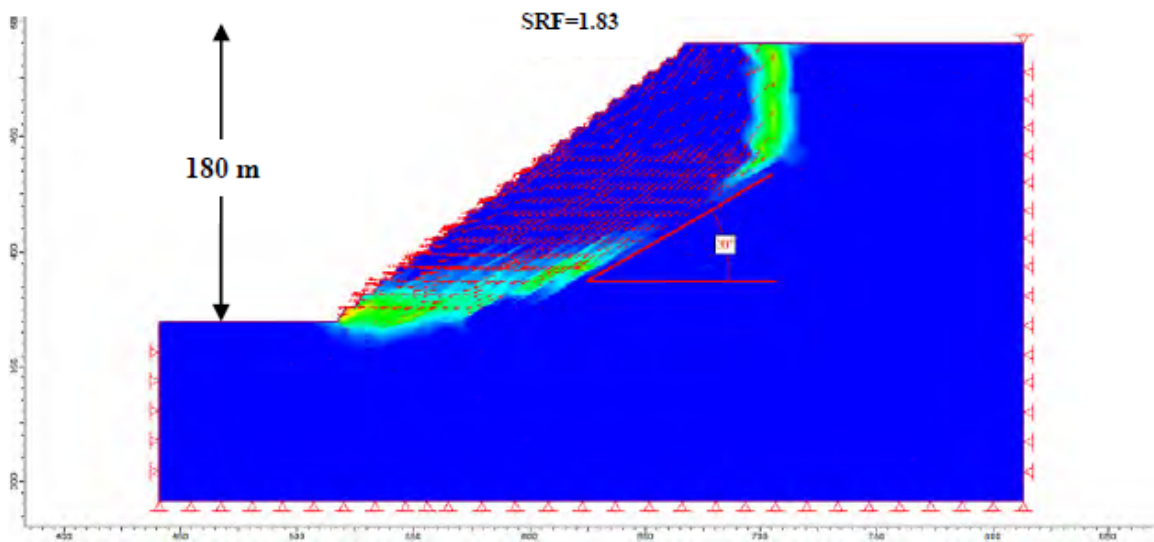


Imagen 11E.- Deformaciones máximas por tensiones de corte para 20 bancos.

La llegar a lo que sería el tajo final y al haberse incrementado en demasía la altura del talud final se produce una rotura conjunta en la que, al observarse detenidamente, se puede ver que, en sí, las discontinuidades llegan a pasar desapercibidas dado que el espaciamiento y persistencia de éstas tienen una magnitud pequeña con respecto a la altura del talud. A estas alturas, el macizo tiene un comportamiento como si se tratara de un material continuo, prueba de esto es el tipo de rotura de tipo circular, un tipo de rotura que se produce en los suelos.

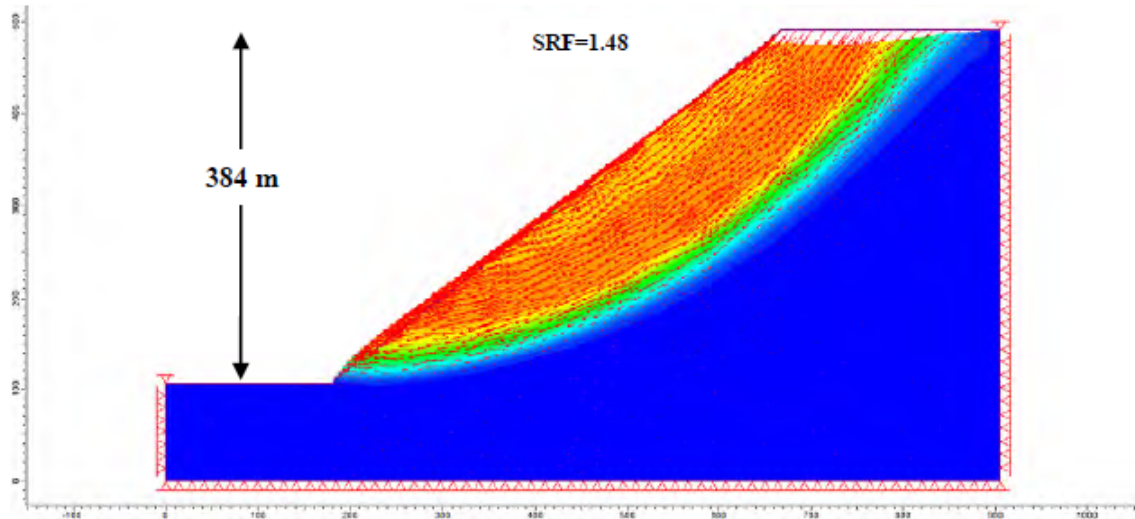


Imagen 12E.- Análisis numérico del mecanismo de rotura plana para 64 bancos.

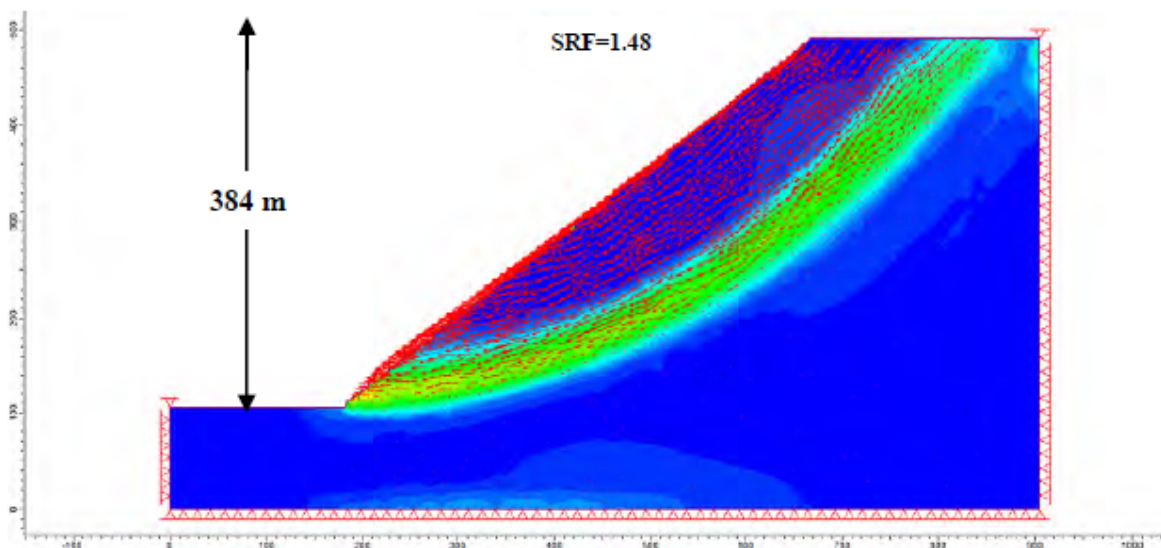


Imagen 13E.- Análisis de deformaciones máximas por tensiones de corte para 64 bancos.

Como se puede ver a lo largo del análisis se percibe como va cambiando el comportamiento del terreno conforme a las condiciones que se presentan y las propiedades asignadas al material.

Es importante ver este tipo de ejemplos para ver la utilidad que tiene el análisis numérico para este tipo de obras y poder implementarlo bien con la finalidad de saber el comportamiento del terreno y las dificultades que se presenten a la hora de la excavación y así tomar las precauciones adecuadas.

Para mayor información de este ejemplo se puede localizar en la siguiente dirección http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1144/1/pozo_gr.pdf



14.2 EJEMPLO 2 PH LA YESCA

Reporte sobre las Condiciones Geológica-Geotécnicas de la Masa Inestable de la Margen Izquierda y las Obras Implicadas.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.

Se encuentra un gran bloque inestable en el margen izquierdo, mediante la excavación que se realizó dicho bloque que estaba confinado y en estabilidad, se volvió inestable por la falta de confinamiento que ahora presenta y tiene posibilidades de deslizamiento.

CARACTERÍSTICAS DEL MACROBLOQUE INESTABLE

Está compuesto de rocas volcánicas densas y duras, intensamente fracturadas, esto es ocasionado por cinco diferentes familias de fracturas más una familia importante de discontinuidades provocada por la pseudoestratificación. Se le llama pseudoestratificación porque las ignimbritas dacíticas y riodacíticas que se encuentran en la zona presentan cierto grado de fluidez que parece una “estratificación”.

Sin embargo, la condición de baja calidad de roca en el bloque, no es solamente por la conjunción de fallas y discontinuidades causadas por la pseudoestratificación, si no también es por el grado de alteración superficial. Todo esto en conjunto es lo que vuelve inestable el mega bloque.

La delimitación del bloque se realizó en base a las discontinuidades más evidentes, posteriormente mediante la instalación de una red instrumental se fueron precisando los límites, especialmente de los extremos oriente y poniente.

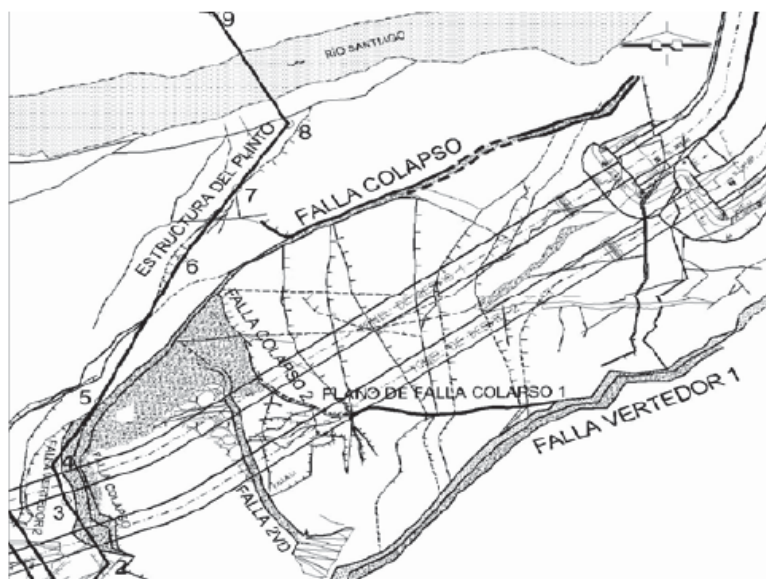


Imagen 14E.- Se puede apreciar el fracturamiento intenso dentro del bloque inestable, en este esquema, aparentemente la familia más recurrente es la N-S, aunque la predominante en toda la zona de obras es la E-W.



Imagen 15E.- Bloque inestable de la margen izquierda, delimitada por las fallas colapso 1, 2 y el dique granítico del portal de entrada de los túneles de desvío.

El bloque inestable está principalmente delimitado por colapso 1 y colapso 2, en la siguiente imagen se puede ver claramente delimitado el bloque con estabilidad precaria al que se le llama “costra de roca de mala calidad”.

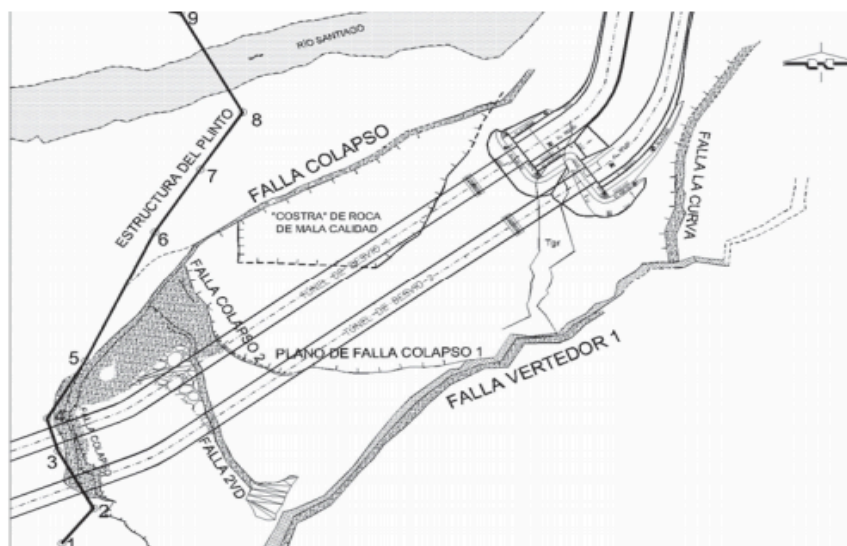


Imagen 16E.- Zona de margen izquierda donde se encuentra la “costra de roca de mala calidad”.

Aspectos geotécnicos del bloque inestable

Como se mencionó anteriormente el bloque está delimitado fundamentalmente por las fallas colapso 1 y colapso 2, así como por las laderas del cerro y el corte por los portales de entrada de los túneles de desvío y su base está en la falla colapso.

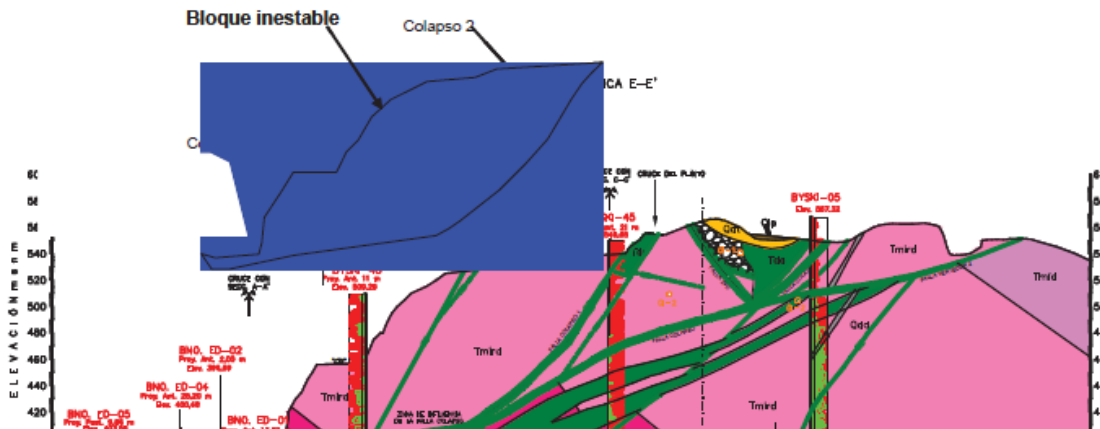


Imagen 17E.- Sección geológica del bloque inestable.

“Las fallas colapso 1 y 2 presentan zonas de brecha poco alteradas y con poco relleno de arcilla, mientras que la falla colapso se encuentra constituida por roca muy alterada y una capa continua de arcilla de muy baja resistencia al corte con espesores entre 10 y 30 cm, producto de la alteración de los materiales de la falla. El espesor total de esta falla varía entre de 2 y 6 m.”

Por arriba de la falla colapso la roca está altamente fracturada, pero con poca alteración, el RQD de los sondeos de la zona presentan valores de 0% lo cual indica un alto fracturamiento debido a los grandes desplazamientos que debió haber tenido en tiempos geológicos esta falla.

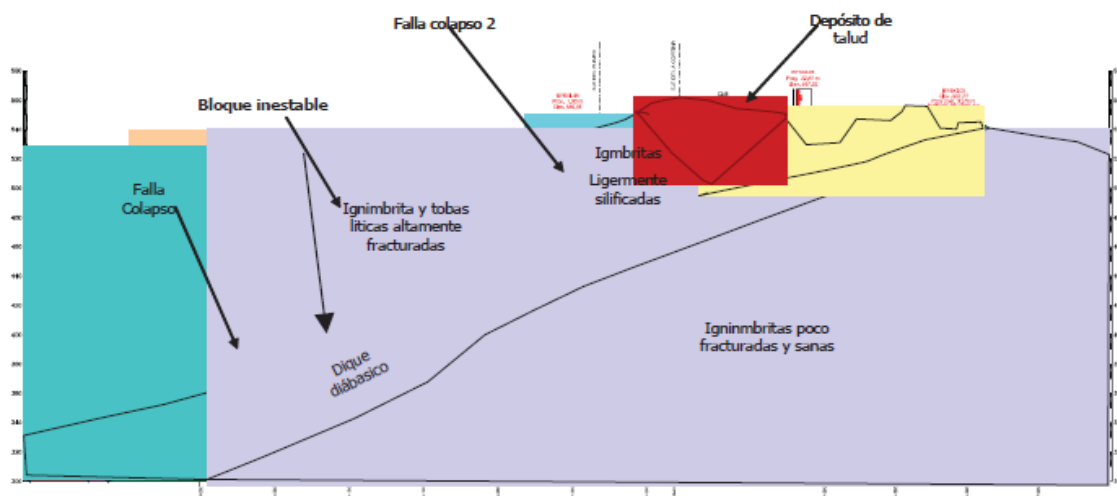


Imagen 18E.- Modelo geotécnico del bloque inestable simplificado.

Puede verse que en la parte superior del dique diabásico y de la falla colapso, el macizo se encuentra altamente fracturado por lo que la deformabilidad es alta y presenta una resistencia baja.

Con la información antes descrita se ejecutó un análisis de estabilidad inverso para determinar los parámetros geomecánicos de la capa arcillosa de la falla colapso, esto suponiendo que el factor de seguridad del bloque inestable se encuentra en 1.0 al momento de observarse los desplazamientos.

Al hacerse el análisis se obtuvo el resultado de que en condiciones naturales y por arriba del nivel del río el ángulo de fricción es de un orden de 17° , por otro lado, al momento de que está saturado el ambiente el ángulo de fricción es de 6° - 7° .

Mediante los datos antes vistos se confirma que el mecanismo de falla es deslizamiento de roca sobre un plano débil o en determinado caso falla circular, esto se debe a que como se encuentra muy fracturado el medio pasa a ser en lugar de un medio discontinuo uno continuo, esto se tiene debido a la remoción que hubo en el pie del bloque (Imagen 19E), dándole salida al mismo, ya que ahí se encuentran los túneles de desvío como se mencionó anteriormente.

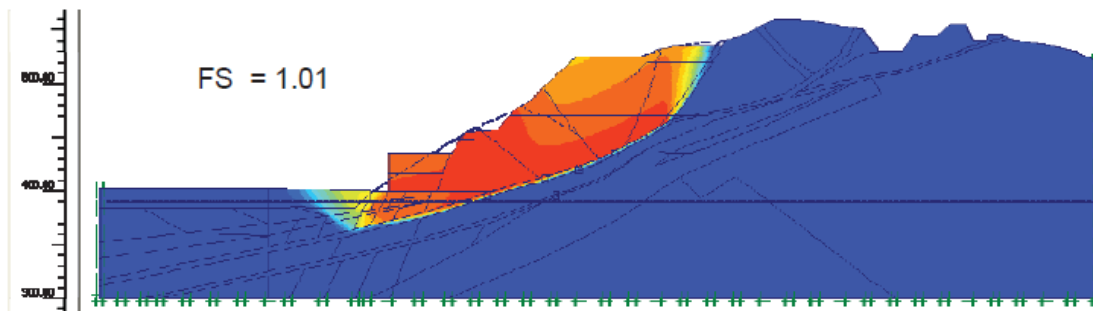


Imagen 19E.- Simulación numérica donde se muestra la remoción del pie de bloque

OBRAS DE ESTABILIZACIÓN INMEDIATAS

Una vez definido y delimitado el deslizamiento, se ejecutaron dos obras de estabilización orientadas a detener el movimiento:

- La primera consistió en la remoción de al menos 180,000 m³ de la parte superior del bloque inestable.
- La segunda en la construcción de un monolito de concreto frente a los portales de entrada de los túneles de desvío hasta la elevación, con un volumen del orden de 120,000 m³.

Mediante estas medidas el bloque prácticamente se detuvo, y como aún había un desplazamiento potencial en el bloque, se volvió a realizar un análisis inverso añadiéndole estas condiciones y considerando un FS de 1.0, los resultados obtenidos fueron de 13° en el ángulo de fricción de la arcilla de la falla colapso, en un medio parcialmente saturado.



Obras de estabilización a largo plazo

Los resultados indican que al momento de reanudar la construcción el deslizamiento se reactivará, por lo que es necesario plantear obras de estabilización adicionales, de las cuales se estudiaron las siguientes opciones:

- Remoción de material en la parte superior del bloque inestable.
- Drenaje del bloque inestable.
- Colocación de relleno de enrocamiento frente a los portales de entrada.
- Construcción de galerías de cortante o fricciones rellenas de concreto intersectando la falla y al rumbo de la misma.
- Relleno con concreto del túnel 1 al final de la construcción en la zona en la que se intersecta con la falla colapso.

De las cuales se consideraron mediante aspectos como la complejidad y afectación al programa de construcción, pero poniendo como prioridad la seguridad del proyecto, y finalmente se redujo la lista a las siguientes:

- Remoción adicional del material en la parte superior del bloque inestable hasta dar un volumen acumulado de $800\,000\text{m}^3$ de material.
- Colocar relleno de enrocamiento frente a portales.
- Construcción de al menos 6 lumbreras de cortante.
- Relleno del túnel de desvió No. 1

El análisis del factor de seguridad nos dice cuál es el método que garantiza que el deslizamiento no se vuelva a reactivar durante la operación de la presa, a continuación, se observa una tabla con los resultados:

Obra de estabilización (1)	Valor del FS para la condición analizada				
	Actual Estático	Marzo 2009 (2) Elev. Embalse +400.0	junio 209 (3) Elev. Embalse +435.0	NAMO Elev. Embalse +576	Vaciado rápido en operación elev +578 +518
D _{1a} + MC	1.04	< 1.0	-----	-----	-----
D _{2a} + MC	1.09	1.02	< 1.0	-----	-----
D _{3a} + MC + R _{1a}	1.43	-----	1.20	1.25	< 1.0
D _{3a} + MC + R _{2a}	1.54	-----	-----	1.33	1.02
D _{3a} + MC + R _{2a} + TD1	1.62	-----	-----	1.58	1.24
D _{3a} + MC + R _{2a} + 6LC	1.61	-----	-----	1.52	1.19
D _{3a} + MC + R _{2a} + TD1 + 6LC	1.70	-----	-----	1.76	1.38

Notas:

- D_{1a}, Excavación de 180,000 m³ de material en parte superior del bloque, hasta la elev. +535
- D_{2a}, D_{1a} más la excavación adicional de 180,000 m³ en parte superior del bloque inestable, hasta la elev. +510
- D_{3a}, D_{2a}, más la excavación adicional de 450,000 m³ en parte superior del bloque inestable, hasta la elev. +480
- MC, Monolito de concreto de 120,000 m³ colocado al frente de portales de los túneles de desvío
- R_{1a}, Relleno con enrocamiento frente al monolito de concreto, hasta la elevación +435.0
- R_{2a}, R_{1a}, + el relleno adicional hasta la elevación +456-0
- TD1, Relleno del túnel 1 con concreto en la zona en donde se intersecta a Falla Colapso,
- 6LC, Construcción de 6 lumbreras de cortante

Por lo tanto, se ve que el método que es más conveniente es el rellenar con concreto el túnel 1 de desvío.

Conclusión:

Para poder tomar una decisión determinante fue necesario el análisis numérico e igualmente considerar las características geológicas de la zona.

Para mayor información sobre el tema consultar:

http://159.16.244.43:90/LB%20CH%20La%20Yesca/CH_La_Yesca_y_LT_Parte412.pdf



XVI.- BIBLIOGRAFÍA

- I. Arthur N. Strahler. Physical Geography. New York: John Wiley & Sons, 1960, 2nd edition, 7th printing, p. 318-319
- II. Barton, N. 1976. The shear strength of rock and rock joints. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 13, 1-24.
- III. Blazquez, J. B. (2016). Sirio, Obtenido de Proyecto manual carretero: https://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf
- IV. García A., Sobre el mecanismo de volteo en taludes y laderas, enfoque numérico aplicado con elemento finito, México, 2016 p.130
- V. Hawking, S. & Mlodinow, L. (2010). EL GRAN DISEÑO. (1ª ed.) USA. Crítica.
- VI. Hoek, E. y Brown, E.T. Practical Estimates of Rock Mass Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol 34, nº8, pp1165-1186, 1997.
- VII. Hoek, E. y Brown, E.T. Practical Estimates of Rock Mass Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol 34, nº8, pp1165-1186, 1997.
- VIII. Hoek, E. y Brown, E.T. Strength of Jointed Rock Masses. Geotechnique 33, Nº3, pp. 187-223, 1983.
- IX. Hoek, E., Blast Damage Factor D, Technical note for RocNews, 2012.
- X. Hoek, E., Carranza-Torres, C.T. y Corkum, B. Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition, 2002.
- XI. Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997 p. 214
- XII. LeVeque, R. J. (2006). Vulnerability of simple reinforced concrete buildings to damage by rockfalls. Landslides. Volume 7, Issue2, pp. 169-180.
- XIII. Montiel E., Influencia de las fallas en el comportamiento de una ladera ante el llenado de un embalse, UNAM, México, 2016 p.81
- XIV. Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.
- XV. Palabora Mining Company". Palabora Mining Company. 2005. Retrieved 14 April 2009.
- XVI. Palmström A., Hakan S., (2014), Rock engineering, 352p0.
- XVII. Palmstöm A., Recientes desarrollos en la estimación des sostenimiento en roca mediante RMI (2003), Universidad Nacional de Colombia, Medellin Colombia, pp. 23-43
- XVIII. PH La Yesca, Reseña de estudios realizado por la GEIC, CFE, 2009 p.39
- XIX. Pozo R., Análisis numérico del mecanismo de falla en macizos rocosos fracturados considerando el efecto escala, Lima Perú, 2014 p. 168
- XX. Regalado, M. A.; Peralta, R. E. & González, R. C. A. (2008). Como hacer un modelo mate mático. Temas de Ciencia y Tecnología. Vol. 12. No. 35. Pp 9-18
- XXI. Rocscience Inc. Slide Version 6.0 - Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. Toronto, 2012.



- XXII. Scheldt, T. (2002). Comparison of continuos and Discontinuos Modelling for Computational Rock Mechanics. Tesis de doctorado. Norwegian University of Science and Tecnology.
- XXIII. Standard Handbook for Civil Engineers, Fourth Edition (2004)
- XXIV. Stille H. and Palmstrom A.: Ground behaviour and rock mass compositions in underground excavations. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, 2008, pp. 46 – 64.
- XXV. Stimpson, B. (1981), “A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core,” Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr;18:63–5.
- XXVI. Tarbuck E. J., Lutgens F. K., Ciencias de la Tierra, Octava edición, 2005 p. 736.
- XXVII. TUCKER, Maurice E., Sedimentary Rocks in the Field, 4th edition, Chichester Wiley, 2003
- XXVIII. Ulrich Smoltczyk, Geotechnical Engineering Handbook, 2002
- XXIX. Wyllie C. D., Mah W. C., Rock Slope Engineering, 2004.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como conclusión de este trabajo es pertinente mencionar que el que haya literatura concerniente a las asignaturas que se estudian en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, es de gran ayuda para el alumno. La mayoría de la literatura que se encuentra de esta asignatura, en particular, es en inglés, y aunque es imperativo que el alumno sepa el idioma en cuestión se me hace de vital importancia que puedan igualmente encontrar literatura en su idioma.

Este trabajo se realizó pensando en el aprovechamiento del alumno, ya que aún sin llevar la asignatura tendrá un lugar donde consultar y obtener una visión general de lo que es la geotecnia de excavación, si bien es importante mencionar que este trabajo no se realizó con respecto al temario, ya que se tomaron en cuenta varios aspectos útiles en el ámbito profesional.

Como recomendación principalmente es darle continuidad a estos proyectos, dado que en este trabajo solo es un pequeño vistazo a la geotecnia de excavación, tiene mucho que se puede mejorar y muchos temas más de los que hablar.

BIBLIOGRAFÍA

- I. Arthur N. Strahler. Physical Geography. New York: John Wiley & Sons, 1960, 2nd edition, 7th printing, p. 318-319
- II. Barton, N. 1976. The shear strength of rock and rock joints. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 13, 1-24.
- III. Blazquez, J. B. (2016). Sirio, Obtenido de Proyecto manual carretero: https://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf
- IV. García A., Sobre el mecanismo de volteo en taludes y laderas, enfoque numérico aplicado con elemento finito, México, 2016 p.130
- V. Hawking, S. & Mlodinow, L. (2010). EL GRAN DISEÑO. (1ª ed.) USA. Crítica.
- VI. Hoek, E. y Brown, E.T. Practical Estimates of Rock Mass Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol 34, nº8, pp1165-1186, 1997.
- VII. Hoek, E. y Brown, E.T. Practical Estimates of Rock Mass Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol 34, nº8, pp1165-1186, 1997.
- VIII. Hoek, E. y Brown, E.T. Strength of Jointed Rock Masses. Geotechnique 33, Nº3, pp. 187-223, 1983.
- IX. Hoek, E., Blast Damage Factor D, Technical note for RocNews, 2012.
- X. Hoek, E., Carranza-Torres, C.T. y Corkum, B. Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition, 2002.
- XI. Hudson A., Engineering Rock Mechanics, 1997 p. 214
- XII. LeVeque, R. J. (2006). Vulnerability of simple reinforced concrete buildings to damage by rockfalls. Landslides. Volume 7, Issue2, pp. 169-180.
- XIII. Montiel E., Influencia de las fallas en el comportamiento de una ladera ante el llenado de un embalse, UNAM, México, 2016 p.81
- XIV. Oyanguren P., Monge L., Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2004, 285p.
- XV. Palabora Mining Company". Palabora Mining Company. 2005. Retrieved 14 April 2009.
- XVI. Palmström A., Hakan S., (2014), Rock engineering, 352p0.
- XVII. PH La Yesca, Reseña de estudios realizado por la GEIC, CFE, 2009 p.39
- XVIII. Pozo R., Análisis numérico del mecanismo de falla en macizos rocosos fracturados considerando el efecto escala, Lima Perú, 2014 p. 168
- XIX. Regalado, M. A.; Peralta, R. E. & González, R. C. A. (2008). Como hacer un modelo matemático. Temas de Ciencia y Tecnología. Vol. 12. No. 35. Pp 9-18
- XX. Rocscience Inc. Slide Version 6.0 - Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. Toronto, 2012.
- XXI. Scheldt, T. (2002). Comparison of continuos and Discontinuos Modelling for Computational Rock Mechanics. Tesis de doctorado. Norwegian University of Science and Tecnology.
- XXII. Standard Handbook for Civil Engineers, Fourth Edition (2004)

- XXIII. Stille H. and Palmstrom A.: Ground behaviour and rock mass compositions in underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, 2008, pp. 46 – 64.
- XXIV. Stimpson, B. (1981), "A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core," *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*;18:63–5.
- XXV. Tarbuck E. J., Lutgens F. K., *Ciencias de la Tierra*, Octava edición, 2005 p. 736.
- XXVI. TUCKER, Maurice E., *Sedimentary Rocks in the Field*, 4th edition, Chichester Wiley, 2003
- XXVII. Ulrich Smolczyk, *Geotechnical Engineering Handbook*, 2002
- XXVIII. Wyllie C. D., Mah W. C., *Rock Slope Engineering*, 2004.