

CAMBIOS GEOTÉCNICOS PRODUCIDOS POR LA METEORIZACIÓN QUÍMICA DE OXIDACIÓN, EN LOS DEPOSITOS DE TOSCA DEL SECTOR EL MORRO DE LOTA.

J. Cifuentes Wackerling¹, R. W. King St-Onge², J. Montenegro Cooper³

RESUMEN

El presente artículo de investigación pretende medir, comparar y comprobar los cambios de diversos parámetros geotécnicos producidos por la meteorización química de oxidación en los depósitos de tosca del sector El Morro de Lota. Este sector presenta alrededor de 6,1 hectáreas de depósitos de estériles con acumulaciones de más de 20 metros de profundidad, donde actualmente se emplazan decenas de viviendas. Por tales motivos creemos importante realizar una investigación para evaluar los cambios producidos en los depósitos de toscas, los cuales se encuentran expuestos por décadas a condiciones climáticas favorables a este tipo de meteorización. La tosca extraída del Pique Carlos, hoy conocida como mina "El Chiflón del Diablo, comuna de Lota, está compuesta mayormente por areniscas y lutitas, con algunas porciones de carbón y otros minerales, como es la pirita; los cuales tienden a oxidarse, provocando cambios en la integridad del material. Para llevar a cabo este trabajo fue necesario realizar una investigación histórica, geográfica, geológica, geoquímica, climática y geotécnica del depósito de toscas en el sector El Morro, para luego obtener dos muestras representativas de material inalterado y alterado para ser comparadas a través de parámetros comúnmente utilizados en los modelos matemáticos de estabilidad de taludes. Finalmente se concluye que la tosca extraída del interior mina "El Chiflón del Diablo", depositada el sector El Morro, por alrededor de 50 años y expuesta a condiciones ambientales de superficie, presentan cambios en sus propiedades geomecánicas, producto de la meteorización química de oxidación.

PALABRAS CLAVES: Tosca/meteorización/carbón/talud

ABSTRACT

This research article aims to measure, compare and verify the changes of various geotechnical parameters produced by chemical oxidation weathering in the tosca deposits of "El Morro" of Lota. This sector presents around 6.1 hectares of sterile deposits with accumulations of more than 20 meters deep, where dozens of homes are currently located. For these reasons we believe it is important to do an investigation to evaluate the changes produced in the tosca deposits, which are exposed for decades to climatic conditions favorable to this type of weathering. The tosca extracted from Piqué Carlos, now known as mine "El Chiflón del Diablo", in Lota, is composed mostly of sandstones and shales, with some coal and other minerals, such as pyrite; which tend to oxidize, causing changes in the integrity of the material. To carry out this research it was necessary to do a historical, geographical, geological, geochemical, climatic and geotechnical investigation of the tosca deposit in "El Morro", to obtain two representative samples of unaltered and altered material to be compared through parameters commonly used in mathematical models of slope stability. Finally, it is concluded that the tosca extracted inside from "El Chiflón del Diablo" mine, deposited in "El Morro" sector, for more than 50 years and exposed to environmental surface conditions, present changes in their geomechanical properties, product of chemical oxidation weathering.

KEYWORDS: Tosca /weathering /coal/slope

¹Juan Cifuentes Wackerling, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jcifuentes@ing.ucsc.cl

²Robert Wallace King St-Onge, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

³J. Montenegro Cooper1, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jmontenegro@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de carbón en Chile se localizan en tres áreas fundamentales, emplazadas en los sectores de la Cuenca de Arauco, Valdivia y Magallanes. Dentro de la cuenca de Arauco se encuentra la ciudad de Lota que tuvo una protagónica importancia en la historia minera de Chile. Mientras el mundo industrializado necesitaba combustible para sus máquinas a vapor, Lota entregó por más de 150 años la materia prima, las cuales dieron movimiento a la industria y a la generación de riquezas en la región. En 1852 Don Matías Cousiño, inicia la explotación del carbón a nivel industrial con más de 10.000 trabajadores, transformando a Lota en una ciudad vanguardista, ya que fue capaz de incorporar las tecnologías más modernas su época (Astorquiza y Galleguillos, 1952).

En ese tiempo fue el combustible utilizado por una gran cantidad de los navíos nacionales e internacionales, debido a que no existía el canal de Panamá. Por tal motivo, el puerto minero de Lota, era una recalada obligatorio para recargar combustible para sus calderas y bodegas. Además, este carbón permitió la navegación triunfal de los barcos de la escuadra nacional en la Guerra del Pacífico. (Astorquiza y Galleguillos, 1952).

Sin embargo, las millones de toneladas de carbón extraído durante décadas, dejó tras de sí numerosos depósitos de estériles, localmente denominada “tosca”, acumulados cerca del mar, en donde hoy se asientan numerosas viviendas. Estos depósitos de tosca, poseen proporciones de carbón despreciables económicamente, pero en cantidades suficientes y en condiciones ambientales específicas, pudiesen generar cambios a través de la meteorización química, específicamente la oxidación.

Se identifican dos grandes depósitos de tosca, en la comuna de Lota, uno ubicado al norte del Parque de Lota, producto de la extracción del Pique Grande y el otro depósito ubicado al noroeste de Lota, por la explotación efectuada en el Pique Carlos, actualmente conocido como mina “El Chiflón del Diablo”, declarado Monumento Nacional de Chile, bajo la categoría de Monumento Histórico en 2009. Este último depósito acumulado en el sector El Morro, el cual presenta una superficie aproximada de 6,1 hectáreas, se encuentra construidas alrededor cuarenta casas, siendo una de ellas destruidas por el terremoto del 27 de febrero del 2010.

Dada la composición de la tosca y exponerla durante prolongados periodos tiempo a diversas condiciones ambientales se puede observar a simple vista, cambios en las propiedades geomecánicas en el depósito de tosca en el sector El Morro, estos cambios probables pueden ser producto de los procesos de meteorización química de oxidación.

Por las razones expuestas anteriormente, surge la inquietud de realizar un estudio, motivado por la evidente oxidación que presenta el sector, debido al cambio que se observan en las toscas de color gris al interior de la mina, a un color naranja a rojizo cuando están en la superficie; por otro lado, no hay evidencia de algún estudio de suelo u obras de estabilidad, siendo un posible peligro para las viviendas y sus moradores que se emplazan en el sector.

De lo anterior surge la pregunta, ¿Es factible medir los cambios de diversos parámetros geotécnicos, producidos por la meteorización química de oxidación en los depósitos de tosca en el sector El Morro de Lota?

Para ello proponemos el siguiente objetivo general de investigación: comprobar los cambios de diversos parámetros geotécnicos producidos por la meteorización química de oxidación en los depósitos de tosca del sector El Morro de Lota.

Para cumplir el objetivo general, proponemos los siguientes objetivos específicos: Recopilar información de antecedentes históricos, geográficos, geológicos, geoquímicos, climáticos y geotécnicos del sector El Morro. Elegir los parámetros geotécnicos según el contexto del depósito a estudiar. Seleccionar las muestras más representativas de los depósitos de tosca alterada y no alterada, para asegurar que ambas poseen el mismo origen. Comprender su composición y condiciones climáticas actuales que presenta el sector para demostrar que el material es propenso a alterarse. Por último, medir y comparar las muestras en el laboratorio para su tabulación, análisis y conclusión de los resultados obtenidos. De los objetivos propuestos podemos desprender la siguiente hipótesis de investigación: La tosca extraída del interior mina “El Chiflón del Diablo” que fue depositada en el sector

El Morro de Lota por alrededor de 50 años y expuesta a condiciones ambientales de superficie presentan cambios en sus propiedades geomecánicas producto de la meteorización química de oxidación.

2. ANTECEDENTES

2.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se ubica en el sector noroeste de la ciudad de Lota, específicamente en el sector El Morro, (Figura 1).

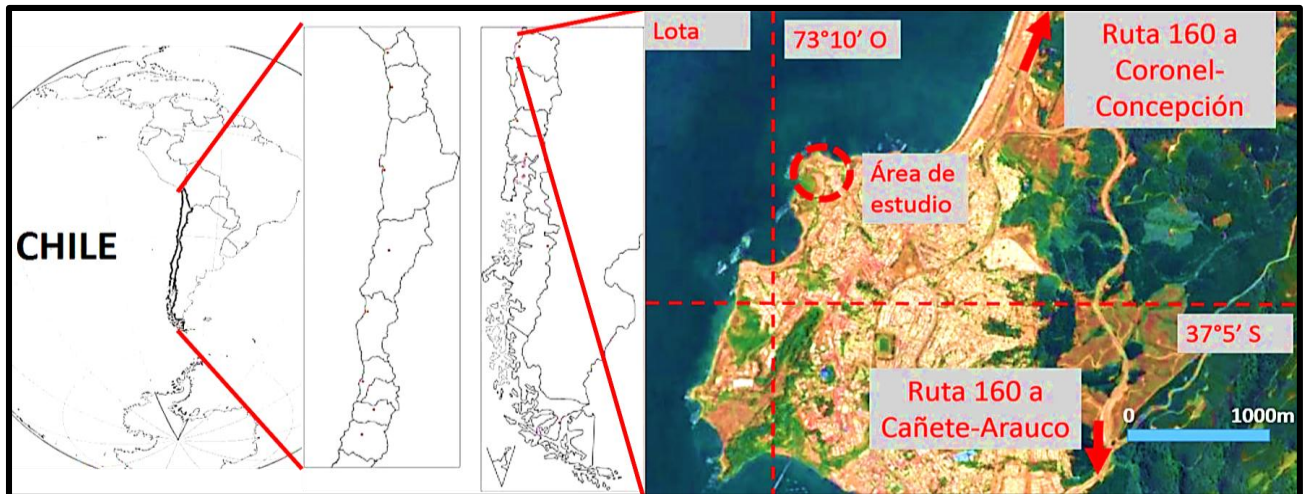


Figura 1: Ubicación del área de estudio. Elaboración propia a partir de Google Earth.

2.2 Antecedentes históricos del depósito de tosca en El Morro.

El Morro de Lota, como forma natural, era una isla de 50m de alto y separada 150m de la costa hasta el siglo XIX, (Figura 2a). Que a comienzo del siglo XX fue destinada como depósitos de toscas, provenientes principalmente de los mantos 4 y 5 del Pique Carlos, actualmente Mina Chiflón del Diablo; uniéndolo al continente (Figura 2b), generando un nuevo paisaje geográfico del sector, transformándose en una península, (Figura 2b). El depósito dejó de ser utilizados aproximadamente en el año 1976, (Vallejos 2017). Actualmente el depósito de tosca del sector El Morro presenta alrededor de 6,1 hectáreas de extensión, 200m de ancho, 300m de largo y 20m de profundidad en algunos sectores (Figura 3).

A finales del siglo XX, Lota presentó una gran explosión demográfica, lo que provocó una necesidad de viviendas; Lota no poseía suficientes terrenos para la construcción de poblaciones, lo que llevó a construir viviendas en cerros y rellenos por depósitos de tosca. Por esta razón, hoy encontramos cuarenta casas con sus respectivas familias en el sector El Morro.

A diferencia de otros depósitos de toscas que presenta la zona, los depósitos de tosca sector El Morro están cubiertos por abundante vegetación, lo que no permite ver a primera vista el tipo de terreno, por otro lado podemos señalar que existen altas probabilidades del desconocimiento, que poseen los habitantes, del tipo de terreno en los cuales están asentadas sus casas. Por lo tanto, debido al origen y al desconocimiento del terreno las viviendas y sus familias pudiesen estar en eminente riesgo.

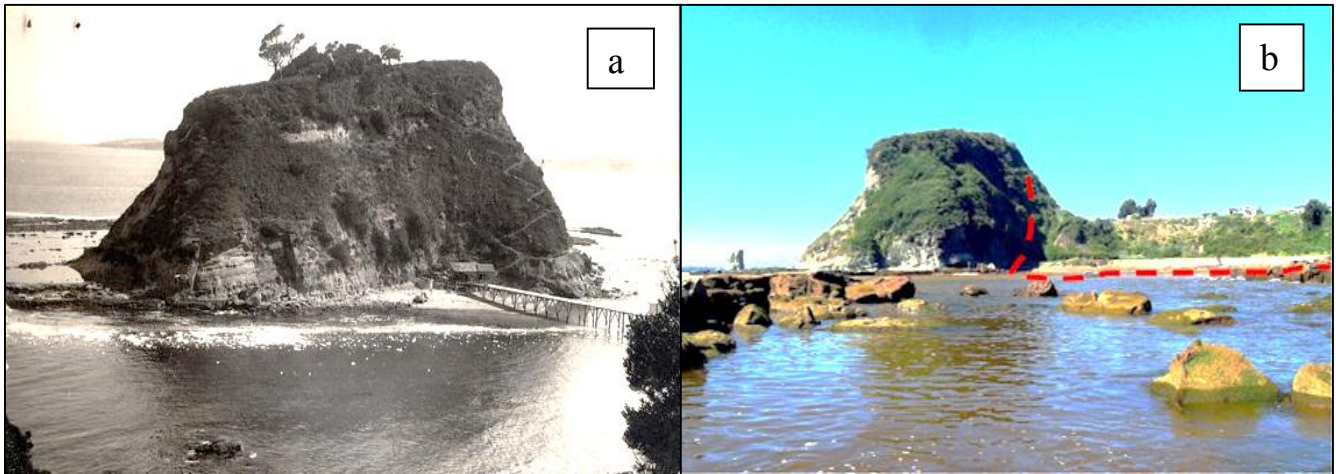


Figura 2: a) Morro de Lota a comienzos del siglo XX, antes de ser ocupado como depósito de tosca, era una isla, (biblioteca nacional, revelada 1905), b) La línea segmentada revela la magnitud del estéril minero el cual produjo un cambio en la geografía local, (Primavera del 2017).



Figura 3: La imagen corresponde al sector el morro, siendo la línea segmentada amarilla, el contorno del depósito de toscas producido por el Pique Carlos actualmente Chiflón del Diablo, la línea segmentada roja muestra donde se encontró evidencia de suelo natural. Elaboración propia a partir de Google Earth.

2.3 Antecedentes Geológicos.

2.3.1 Cuenca de Arauco

Lota se encuentra en la parte norte de la cuenca sedimentaria cretácico-terciaria de Arauco, emplazada en la actual Península de Arauco y en la plataforma continental de Suramérica. Está caracterizada por una alternancia de secuencias sedimentarias marinas y continentales. Las que se disponen sobre un basamento de rocas pre-mesozoicas metamórficas y roca intrusiva del Batolito de la Costa (Frutos, 1975; Pineda, 1983 y Pineda, 1984).

2.3.2 Formaciones geológicas en el sector.

La Formación Quiriquina (Steinmann, 1884 y 1889), se deposita en el Senomiano entre los 96 a 91 M.a. Por secuencias transgresivas, producto de la subsidencia que dio origen a la cuenca de Arauco, (Pineda, 1984). La Formación Pilpilco (Muñoz Cristi, 1946 y 1968; Blanco *et al.*, 1974), datada para el Eoceno Inferior, entre los 55,8 y 48,6 M.a se Generan, interrumpiéndose la sedimentación marina, provocando secuencias tanto litorales como continentales al producirse una emersión de la cuenca de Arauco ubicándose al oriente de esta (Pineda 1984). La formación Pilpilco junto con la Formación Boca-Lebu (Muñoz Cristi, 1956) podría corresponder al mismo episodio marino al occidental de la cuenca de Arauco (Pineda, 1984). La Formación Curanilahue (Muñoz Cristi, 1956) se ubica en el sector oriental de la cuenca de Arauco, en ella hay evidencia de dos episodios regresivos: el Miembro Lota y el Miembro Colico, los que están separados por el Miembro de Intercalación que corresponde a una secuencia marina. Durante el Eoceno entre los 34 y 40 M.a, se produce la depositación de dos formaciones, la primera la Formación Millongue (Muñoz Cristi, 1956) que se encuentran al occidente de la Isla Santa María y la segunda la Formación Trihueco, además. Esta unidad está conformada por areniscas, lutitas y arcillolitas, con impresiones de flora fósil, que afloran en el sector occidental de la Isla Santa María. De acuerdo a su posición estratigráfica y a su contenido fósil se le asigna una edad Eoceno Superior M.a 37 a 40 M.a, (Ferraris y Bonilla, 1981), (Figura 4).

Formación Trihurco (Muñoz Cristi, 1956) al occidente de la Península de Arauco, luego de que se depositara a través de una trasgresión marina, la Formación Boca Lebu, se generan depósitos de secuencias continentales y en ambas presentan mantos de carbón. En el Mioceno entre los 5,3 a 23,5 M.a, sedimenta la Formación Ranquil (Tavera, 1942; Garcia, 1968) como resultado de una trasgresión sobre la Península de Arauco, generando depósitos marinos en el sector. Finalmente para el Plioceno entre los 2,3 a 5,3 M.a, sedimenta la Formación Tubul, debido a la fase tectónica compresiva de fines del Mioceno, (Frutos 1980), (Figura 4).

2.3.3 Geología local

El área geológica relevante para este estudio, se encuentra en Lota, sector El Morro, cercano al Pique Carlos, actual mina “El Chiflón del Diablo”. Como el estudio se centra en los depósitos de estériles generados por la prolongada explotación del carbón, podemos señalar, que dicho mineral es de la Formación Curanilahue, presente en toda la explotación de la mina, más específicamente, el Miembro Lota, donde se concentran todos los mantos de carbón y que presentan un origen en el Paleoceno Superior entre los 63 y 58,5 Ma. (Cespedes, 1977).

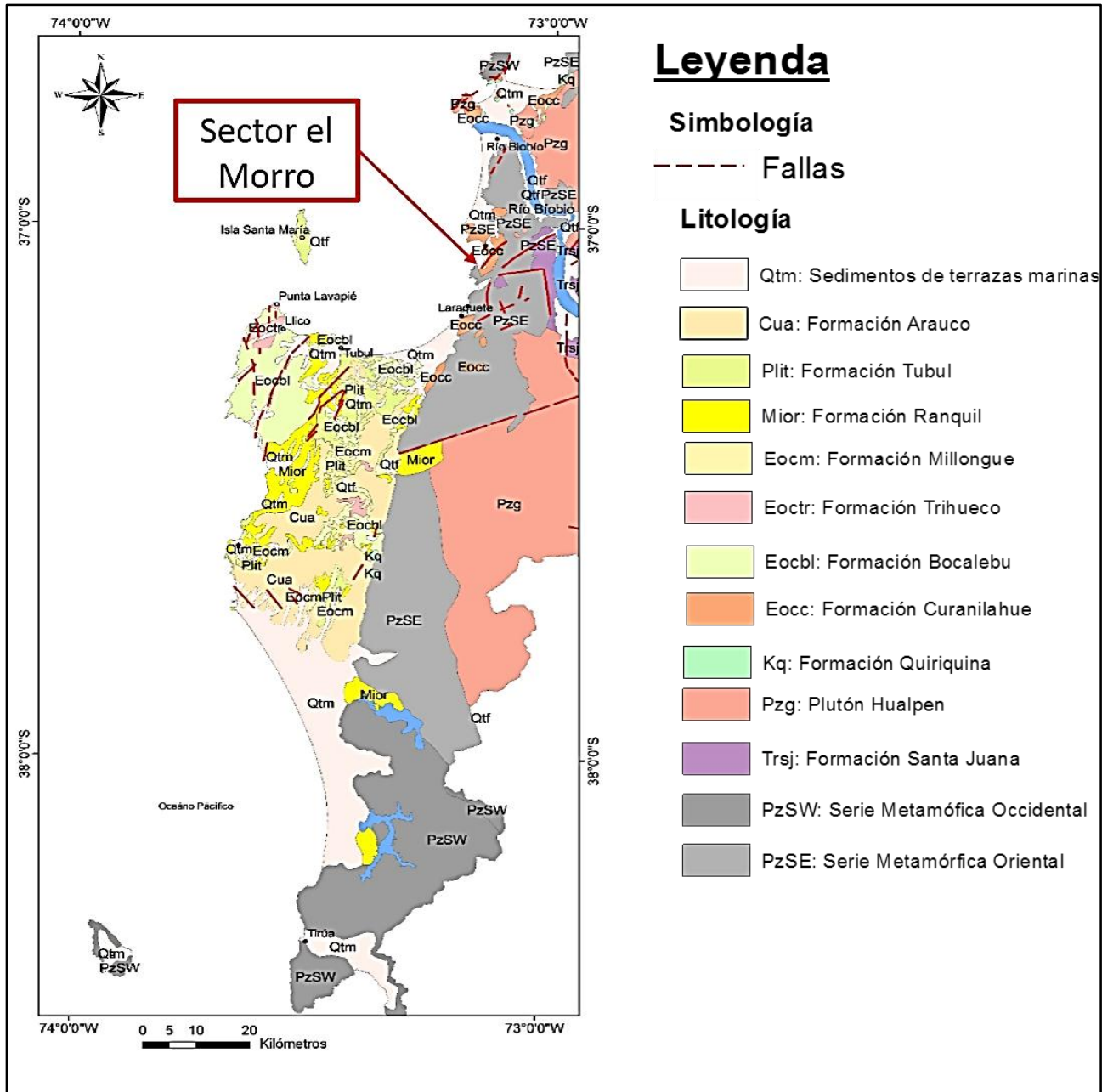


Figura 4: Formaciones Geológicas presentes en la cuenca de Arauco, modificado de (Modificafo de Quinzio *et al.*, 2000 a 2001).

En el sector entre Lota y Coronel se reconocieron 9 mantos de carbón, (Machado, 1905) intercalados principalmente por areniscas, lutitas y arcillolitas, con una tonalidad gris clara a media, (Figura 6a). Muchos de estos mantos, no presentan una potencia de gran relevancia, por lo cual nunca fueron explotados por las minas principales. En el sector del Pique Carlos, actual mina “El Chiflón del Diablo”, donde se generó el depósito de estériles en estudio, producto de la extracción de los mantos de carbón 4 y 5. El orden numerativo varia con respecto a cada mina, por esta razón utilizamos el orden basado en el estudio de Grez (1979) y Collao (1984) para evitar confusiones.

Según Grez (1979), como se observa en la columna estratigráfica de la Figura 5, podemos señalar que los estériles que acompañan al manto 5 son arcillolitas y los del manto 4, areniscas finas a lutitas. De esta forma sabemos que todos los restos correspondientes a arcillolitas serían del manto 5 y las areniscas finas a lutitas del manto 4. Debido a que el manto 5 presentaba 1,3 metros de espesor en promedio; por lo tanto la tosca llevada a superficie fue menor, debido a que las mismas galerías bastaban para depositar gran parte de las toscas generadas. A diferencia del manto 4 por su grosor de 0,64m, lo que provocaba que se cavara mucho más y se generara mayor cantidad de tosca para ser posible el paso de maquinarias, tránsito de mineros y todos los recursos técnicos.

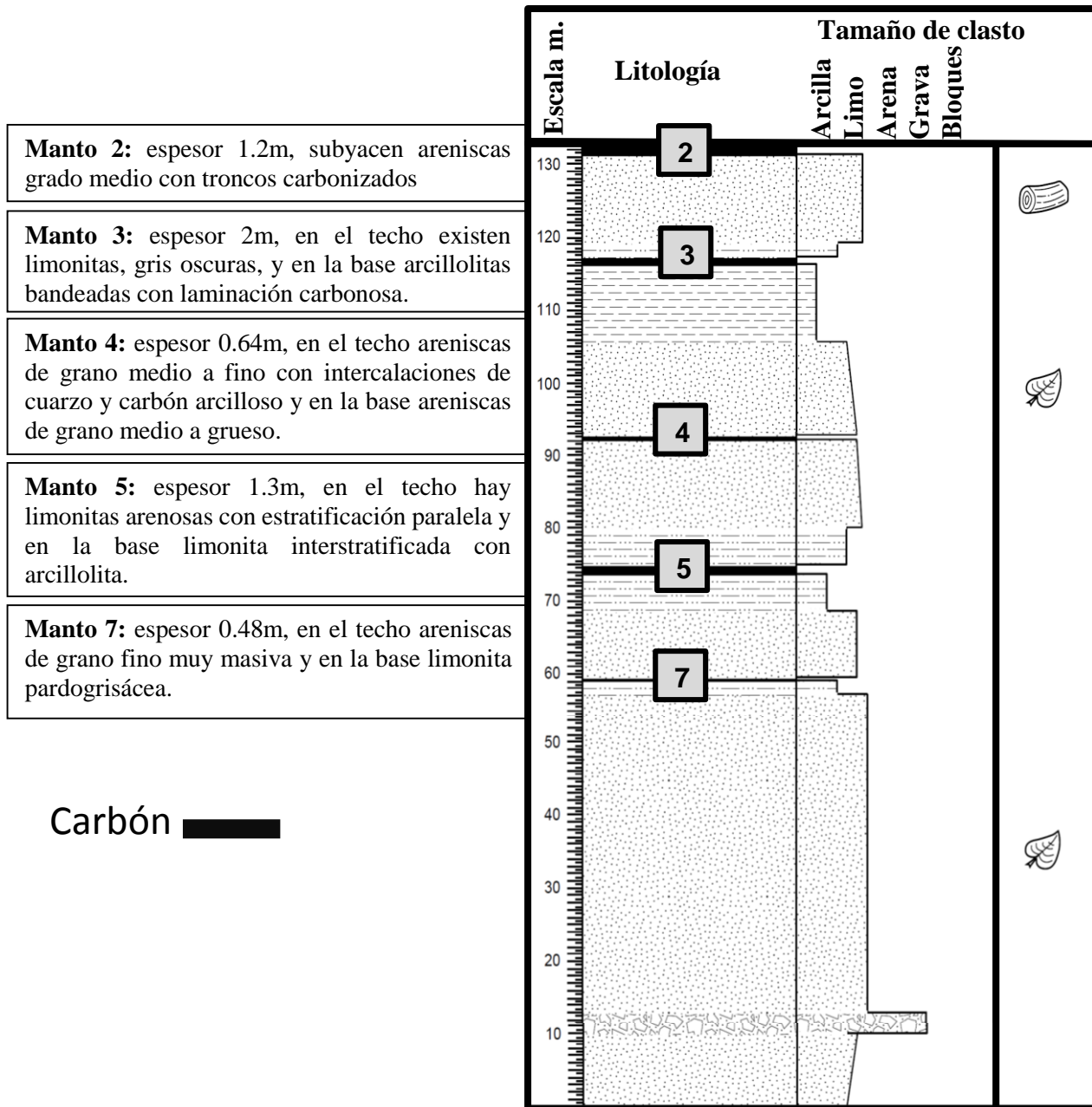


Figura 5: Columna estratigráfica, que presenta al Miembro Lota con los mantos de mayor importancia presentes en los alrededores del área de estudio, (Modificado de Grez, 1979).

2.4 Proceso de generación de tosca

La minería trajo consigo muchos avances tecnológicos de última generación, sin embargo, en el frente minero, durante el fin del siglo XIX, la maquinaria era rudimentaria, utilizando pólvora negra, carros tirados por caballos y mucha fuerza humana. En 1863 constaba con sólo 18 máquinas a vapor para el traslado del mineral. En 1908 la pólvora negra fue reemplazada por explosivos de seguridad con detonadores eléctricos, en 1913 se introdujo la primera máquina circadora “Pick-Quick”, en 1915, los caballos fueron reemplazados en el interior de las minas por locomotoras eléctricas y se instala el primer transportador de frente. Esto permitió mejorar las condiciones laborales de los obreros y elevar la extracción del carbón. En 1852 se extraían 7.815 tn; en 1932, 597.524 tn y para 1952, 1.150.000 tn. Con una fuerza de trabajo de 6.544 hombres, (Astorquiza y Galleguillos, 1952).

Principalmente la extracción se hizo por medio de galerías, de alrededor de 3 metros de ancho y su altura variaba según la potencia del manto del carbón y del trabajo realizado en ella. Posteriormente, con los avances tecnológicos, las galerías abiertas serían implementadas por máquinas eléctricas, las cuales trasladaban gran cantidad de herramientas, turnos enteros de mineros y especialmente el carbón y la tosca extraída del interior de la mina, (Vallejos, 2017).

La altura de las galerías eran de alrededor de los 2 metros o más; sin embargo, si esta sólo tenía como fin extraer el mineral, su altura era la que poseía el manto de carbón; que en algunos casos, sólo llegaba a unos 64 cm. Además esta era llenada por estériles de otros frentes de mina, cuando se terminaba su vida útil. De esta forma se evitaba colapsos, disminuyendo la pérdida del flujo de aire y reduciendo la extracción de estériles sobrantes llevados a superficie, (Vallejos 2017).

El estéril, proveniente de la explotación del carbón, generalmente presentaba grandes proporciones de carbón adheridas. Como consecuencia se debía hacer un proceso de separación del mineral de la roca, utilizando el proceso de lavado del carbón, que consistía en pasar el estéril por un flujo de agua, cuyo canal presentaba pequeñas represas, en las que el estéril de mayor densidad se concentraba en el fondo y el carbón continuaba con el flujo sin sedimentar. Sin embargo, este método provocaba que la tosca se quedara con proporciones muy altas de carbón. Por este motivo, generalmente se desechaba el producto sin mayor tratamiento, siendo más económico venderlo sin un mayor tratamiento.

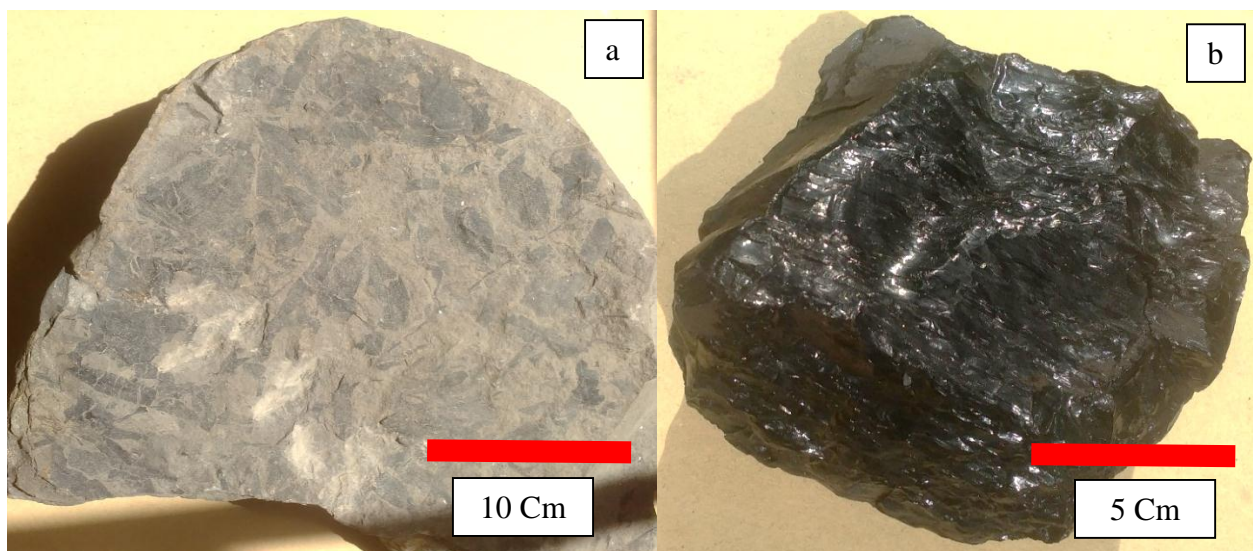


Figura 6: Muestras obtenidas del manto 4 en el Chiflón del Diablo, a) es una muestra de un ejemplar de tosca concordante con el techo del manto. b) Corresponde a una muestra de carbón del techo del manto.

Muchas veces la forma de discriminar entre toscas y carbón, simplemente era por experiencia del minero, de forma visual, ya que la tosca presenta un gris opaco (Figura 6a), a diferencia del carbón de los mantos explotados, que presentaban un color negro muy brillante, (Figura 6b).

2.5 Características y composición de los carbones en general.

Como los procesos de meteorización de la roca estudiada es principalmente la oxidación, es importante tener en cuenta la composición de la roca que se va a estudiar.

El carbón mineral o carbón es un sedimento orgánico constituido por restos vegetales, transformados durante la diagénesis y/o el metamorfismo (Llorente, 1999).

El Carbonífero (360-290 Millones de años (Ma)), fue el periodo de mayor formación de este combustible fósil en el planeta, aunque existen yacimientos que se formaron en el intervalo comprendido entre los periodos del Pérmico y Paleógeno Medio (290-52 Ma), ejemplo de ello son los mantos de carbón del Miembro Lota que según Cespedes, (1977), datan entre los 63 y 58,5 Ma.

El carbono es el elemento químico principal del carbón, que además contiene hidrógeno, oxígeno, nitrógeno así como azufre y volátiles. La proporción de carbono del combustible fósil, está condicionada por el grado de diagénesis o metamorfismo y distingue los diferentes tipos de carbón (Majuto, 2011).

2.5.1 Contenido de humedad

La humedad contenida en una roca de carbón, puede ser por razones ambientales o de la propia humedad de la roca desde génesis; es así que a 30°C en presencia de una humedad relativa del 97%, el carbón llegará a un equilibrio y esta variará según el tipo de carbón.

2.5.2 Contenido de cenizas

Las cenizas en el carbón es el resultado del residuo sólido, generado por una combustión total. A mayor contenido de ceniza, menor es su poder calorífico.

2.5.3 Los volátiles

Los volátiles se desprenden en la parte inicial de la combustión del carbón, y pueden ser hidrógeno, óxidos de carbono, metano y otros hidrocarburos de bajo peso molecular. Un contenido excesivo de volátiles, considerado sobre el 30%, aumenta las posibilidades de combustión espontánea, (Laboratorio Oficial de Madrid, 1992).

2.5.4 Poder calorífico

El poder calorífico es uno de los principales parámetros, que es utilizado para definir el tipo de carbón. Se define como la cantidad de calor que se libera cuando se quema el carbón en condiciones normalizadas.

2.5.5 Contenido en carbono fijo

El carbono fijo, es el contenido calculándose por diferencia a 100 de la suma de los contenidos, en por ciento de humedad, volátiles y cenizas del carbón secado al aire.

2.6 Clasificación de los carbones

El carbón es un mineral común en el mundo y una fuente importante de energía utilizado por siglos. Debido a lo anterior, ha sido sometido a una variedad de estudios, por esto existen distintas clasificaciones de los distintos tipos de carbón. Sin embargo, la clasificación más aceptada es la que hacen referencia al grado de carbonificación o metamorfismo, considerando la forma progresiva de transformación que presenta en la naturaleza. La Sociedad Americana para Ensayos de Materiales (ASTM por sus siglas en inglés), clasifica el carbón en cuatro tipos: lignito, subbituminoso, bituminoso y antracita, siendo el lignito de menor rango y la antracita de mayor rango, como muestra la Tabla 1.

Los parámetros de clasificación, en carbones de alto rango, es el contenido de carbono fijo y materia volátil, y en el caso de bajo rango, se utiliza su valor calorífico.

Tabla 1: Clasificación del carbón según los límites de carbono fijo, materia volátil y del poder calorífico, modificado de la norma de clasificación del carbón por rango (ASTM D388).

| CLASE/GRUPO | | Límites de Carbono Fijo %m (bsimm) | | Límites materia Volátil %m (bsimm) | | Límite Valor del poder calorífico (imm)Btu/lb | | Carácter Aglomerante |
|---------------|---------------------------|------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|-----------------------------------------------|-------|--------------------------------------|
| | | =< | < | > | =< | =< | < | |
| Antracítico | Metaantracítica | 98 | --- | --- | 2 | --- | --- | No Aglomerante |
| | Antracítico | 92 | 98 | 2 | 8 | --- | --- | |
| | Semiantracítica | 86 | 92 | 8 | 14 | --- | --- | |
| Bituminosos | Bituminoso Bajo Volátil | 78 | 86 | 14 | 22 | | | Comúnmente Aglomerante o Aglomerante |
| | Bituminoso Medio Volátil | 69 | 78 | 22 | 31 | | | |
| | Bituminoso Alto Volátil A | --- | 69 | 31 | --- | 14000 | --- | |
| | Bituminoso Alto Volátil B | --- | --- | --- | --- | 13000 | 14000 | |
| | Bituminoso Alto Volátil C | --- | --- | --- | --- | 11500 | 13000 | |
| Subbituminoso | Subbituminoso A | --- | --- | --- | --- | 10500 | 11500 | No Aglomerante |
| | Subbituminoso B | --- | --- | --- | --- | 9500 | 10500 | |
| | Subbituminoso C | --- | --- | --- | --- | 8300 | 9500 | |
| Lignitos | Lignito A | --- | --- | --- | --- | 6300 | 8300 | No Aglomerante |
| | Lignito B | --- | --- | --- | --- | --- | 6300 | |

2.7 Fenómeno de Oxidación y Combustión del Carbón

Según (Casas, 2014), el carbón al estar en condiciones de intemperie sufre deterioro en su estructura, debido a la humedad presente en el ambiente y a la oxidación producto del flujo de oxígeno a través de sus poros. Estos procesos influyen en la temperatura a medida que el proceso de oxidación aumenta, generando cambios físico-químicos en los parámetros del carbón. Mientras se incrementan el peso, contenido de oxígeno y temperatura de ignición, también disminuyen el contenido de hidrógeno, poder calorífico y el tamaño medio de las partículas. Un pequeño flujo de aire, no otorga la cantidad necesaria de oxígeno y un gran flujo generaría disipación del calor generado. Sólo si la humedad y el flujo de aire es el indicado, se puede generar una acumulación de energía que aumentará progresivamente.

El aire posee un elemento oxidante, como es el oxígeno, que altera al carbono generando, una reacción que libera calor y produce dióxido de carbono, como lo demuestra en la ecuación (1).



Si este calor, supera la temperatura de ignición del carbón, esto produce una reacción química denominada, combustión espontánea del carbón.

Según el estudio de (Laboratorio Oficial de Madrid, 1992), el contenido de pirita sería un factor clave en los procesos de almacenamiento del carbón, siendo un hecho conocido en la minería. Afecta mayormente cuando se encuentra en grandes proporciones y en cristales pequeños, y al ser de mayor dureza que el carbón, este se fractura en fragmentos más pequeños, aumentando su superficie expuesta al aire y produciendo un medio favorable para aumentar la oxidación del carbono en dióxido de carbono, lo que genera una elevación de la temperatura, debido al calor liberado, Además la propia oxidación de la pirita aporta de forma negativa, sumando calor al sistema.

2.8 Clasificación del carbón estudiado.

Según la clasificación ASTM D388, el carbón estudiado que pertenece a la Bahía de Arauco clasificaría como carbón Bituminoso de Alto Volátil A. Flores, *et al.*, (1984), (Tabla 2).

Tabla 2: Composición de los yacimientos de carbón de Chile (Modificado de Flores, *et al.*, 1984).

| | Bituminosos | | Lignitos | | |
|---------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|----------|------------|
| | Bahía de Arauco | Provincia de Arauco | Bahía de Talcahuano | Valdivia | Magallanes |
| Peso específico | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,4 | 1,36 |
| A. hidrométricos | 2,8 | 3,5 | 12,4 | 11,7 | 17,6 |
| M Volátiles | 41,8 | 37 | 35 | 35 | 41,7 |
| Carbono fijo | 52 | 54 | 46,5 | 33,0 | 30,7 |
| Cenizas | 3,4 | 5 | 6,1 | 21 | 10 |
| Poder Calorífico (Btu/lb) | 14017 | 13478 | 11232 | 8626 | 8560 |

2.9 Antecedentes geoquímicos del carbón y tosca estudiada

Según la investigación de Collao, (1984), el promedio de azufre en los carbones de Lota y Schwager, es mayor al contenido mundial (ver Tabla 3) y supera el límite para ser usado en la fundición del acero. Sin embargo, los mantos presentes en el depósito de tosca del sector El Morro provienen de los mantos de carbón 4 y 5, los cuales presentan menor contenido de azufre total y pirítico (Tabla 4).

Otro aspecto importante a destacar de esta investigación, es que el contenido de azufre aumenta a medida que uno se acerca al techo del manto de carbón, de lo cual podemos inferir que la tosca estudiada presenta un mayor contenido pirítico, ya que la tosca mayormente extraída, era la del techo de las galerías.

Tabla 3: Porcentaje de azufre pirítico “Sp”, orgánico “So”, Sulfático “Ss” y total “St” que presenta los mantos de carbón estudiados con yacimientos de estados unidos y el promedio mundial (Modificado de Collao, 1984).

| AZUFRE % | LOTA SCHWAGER | MANTO 4 Y 5 LOTA SCHWAGER | USA | PROMEDIO MUNDIAL |
|----------|---------------|---------------------------|------|------------------|
| Sp | 1,91 | 0,53 | 1,10 | - |
| So | 0,75 | 0,435 | 1,10 | - |
| Ss | 0,10 | 0,23 | 0,08 | - |
| St | 2,02 | 1,09 | 2,23 | 1,6 |

Tabla 4: Porcentaje de azufre pirítico “Sp”, orgánico “So”, Sulfático “Ss” y total “St” cada manto de carbón que están presentes en las cercanías del lugar de estudio, destacándose el manto 4 y 5 tratados en este estudio, (Modificado de Collao, 1984).

| MANTO | PARÁMETROS ESTADÍSTICOS | CEN % | Sp % | So % | Ss % | St % |
|--------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2 | \bar{X}/S | 12,5/12,3 | 2,35/1,98 | 1,04/0,58 | 0,13/0,19 | 3,47/2,38 |
| 3 | \bar{X}/S | 22,6/21,9 | 0,78/0,69 | 1,05/0,77 | 0,02/0,01 | 1,85/1,41 |
| 4 | \bar{X}/S | 4,4/3,1 | 0,21/0,54 | 0,21/0,16 | 0,14/0,17 | 0,56/0,55 |
| 5 | \bar{X}/S | 10,7/16,2 | 0,86/1,65 | 0,66/0,42 | 0,09/0,23 | 1,62/1,86 |
| 7 | \bar{X}/S | 10,6/9,0 | 1,30/0,90 | 0,36/0,15 | 0,10/0,22 | 1,79/0,92 |
| Conjunto de Mantos | \bar{X}/S | 11,9/15,7 | 1,19/1,73 | 0,75/0,53 | 0,10/0,21 | 2,02/2,04 |

2.10 Características actuales del depósito estudiado.

El depósito de tosca del sector El Morro presenta dos caras muy pronunciadas buzando al norte y la otra al sur, ambas paralelas orientadas en dirección Este-Oeste, con una inclinación de alrededor de 60°, con una altura de 20 metros sobre nivel del mar en su parte superior, con inclinaciones muy bajas, las que han sido aprovechadas para el emplazamiento de casas.

No se encontraron evidencias en el depósito de tosca desde su origen, formación y posterior abandono, alguna obra de estabilidad. Por lo tanto es muy probable que la estabilidad actual del sector sea sólo por el factor tiempo, gravedad y algunos eventos naturales, como fuertes sismos, siempre presentes las etapas de su formación.

El depósito de tosca del sector El Morro presenta abundante vegetación, si es comparada con otros depósitos de tosca de las cercanías, la que esta principalmente cubiertas por pasto y algunos arbustos; además en las visitas en terreno, luego de intensas lluvias no se observó el apostamiento de agua; lo que demuestra que el terreno posee buen drenaje; esto es explicado por la acumulación de restos de rocas irregulares de diferentes tamaños, con poca proporción de finos.

2.11 Parámetros geotécnicos utilizados

La mejor forma de abordar y considerar las características del terreno, es la de un talud, por lo que debemos considerar los parámetros geotécnicos para compararan las muestras, también de esta forma seria una guía a considerar para alguna futura investigación o intento de estabilización del lugar.

Considerando la gran variedad de métodos disponibles para evaluar la estabilidad de un talud, se realizó un resumen de todos los parámetros geotécnicos necesarios, para los métodos más comunes (Tabla 5), luego se evaluaron cada uno de los parámetros con la finalidad de poder realizar una comparación de los resultados entre ambas muestras.

2.11.1 Ángulo de fricción interna y residual

El ángulo de fricción, es el resultado de la pendiente que se genera, de la relación de la tensión de corte versus la normal, la cual varía, según lo requerido durante la aplicación del corte. Sin embargo, debemos considerar también el deslizamiento en los contactos entre clastos, grado de compactación, dilatancia, rotura de partículas, humedad, velocidad de ensayo, tamaño y la forma en que se producen un reordenamiento de los clastos, entre otros factores que arán variar la relación, (Bilz, 1995).

La rotura de los clastos como consecuencia de ensayos a altas presiones, debería absorber energía, causando que el ángulo de fricción corregido por dilatación, sea mayor al ángulo de fricción de deslizamiento entre partículas. Por ende, en los ensayos a altas presiones de confinamiento, la falla se produce a grandes deformaciones, generando un aumento en la energía requerida para el remoldeo y reordenamiento de los granos (Lee and Seed, 1967). Esto provoca una curvatura de la envolvente de falla, a menos que los ensayos sean realizados a presiones de confinamiento menores a 1kg/cm^2 (Mitchell, 1993).

Tabla 5: Listado de métodos para el cálculo de estabilidad de taludes, con sus respectivos parámetros geotécnicos más relevantes, (modificado de Suarez, 2002).

| Autor | Parámetros | Inclinación de Talud | Método analítico utilizado | Observaciones |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Taylor (1948) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión no drenada ▪ Cohesión ▪ Ángulo de fricción interna | 0 a 90° 0 a 90° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ángulo de fricción =0 ▪ Círculo de Fricción | Análisis no drenado. Taludes secos solamente |
| Bishop y Morgenstern (1960) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión ▪ Ángulo de fricción | 11 a $26,5^\circ$ | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bishop | Primero en incluir efectos del agua |
| Gibson y Morgenstern (1960) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión no drenada | 0 a 90° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ángulo de fricción interna =0 | Análisis no drenado con cero resistencias en la superficie y cohesión no drenada aumenta linealmente con respecto a la profundidad |
| Spencer (1967) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión. ▪ Ángulo de fricción - interna | 0 a 34° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Spencer | Círculos de pie solamente |
| Janbú (1968) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión no drenada ▪ Cohesión ▪ Ángulo de fricción interna | 0 a 90° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ángulo de fricción interna =0 ▪ Janbú GPS | Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión |
| Hunter y Schuster (1968) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión no drenada | 0 a 90° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ángulo de fricción interna =0 | Análisis no drenado con una resistencia inicial en la superficie y cohesión no drenada aumenta linealmente con la profundidad |
| Chen y Giger (1971) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión ▪ Ángulo de fricción interna | 0 a 20° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis límite | |
| O'Connor y Mitchell (1977) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión ▪ Ángulo de fricción interna | 11 a 26° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bishop | Bishop y Morgenstern(1960) extendido para incluir $N_c=0.1$ |
| Hoek y Bray (1977) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión ▪ Ángulo de fricción interna | 0 a 90° 0 a 90° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Círculo de fricción ▪ Cuña | Incluye agua subterránea y grietas de tensión. Análisis de bloque en tres dimensiones. |
| Cousins (1978) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión ▪ Ángulo de fricción | 0 a 45° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Círculo de Fricción | Extensión del método de Taylor (1948) |
| Charles y Soares (1984) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ángulo de fricción | 26 a 63° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bishop | Envolvente de Falla no lineal de Mohr-Coulomb |
| Barnes (1991) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cohesión ▪ Ángulo de fricción interna | 11 a 63° | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bishop | Extensión de Bishop y Morgenstern (1960) para un rango mayor de ángulo del talud |

Cuando se quiere medir la tensión de corte versus la normal que actúan en una superficie ya fallada, la pendiente de esta relación forma el ángulo de fricción residual, que va a depender de la de la resistencia residual que comprenda la falla, según Suarez, (2002) Es la resistencia al corte que posee el material después de haber ocurrido la falla

2.11.2 Cohesión

Se define como la resistencia al corte que presenta el suelo en ausencia de cualquier esfuerzo de compresión, actuando sobre el esqueleto del suelo o en un plano de falla. Confirmar la existencia y valor de la cohesión, es difícil, ya que la proyección de la envolvente de falla $\sigma^3=0$ es incierta, debido a la curvatura de la envolvente de falla, a menos que los ensayos sean realizado a presiones de confinamiento menores a 1kg/cm^2 (Mitchell, 1993).

2.11.3 Cohesión aparente o succión

En los suelos no saturados el agua, en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares. Esta cohesión aparente desaparece con la saturación, (Suarez, 2002). Según Freedlund, (1995), está compuesta de dos elementos básicos: la succión matricial y la succión osmótica. La suma de los dos componentes se llama succión total. La succión matricial se define como la diferencia entre la presión del aire, la presión de poros y la succión osmótica depende de las características químicas del fluido en los poros.

2.11.4 Granulométrica y tamaño de partículas

La granulometría es la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que contribuyen y presentan una muestra de suelo. Según estas distribuciones, hay parámetros como el coeficiente de uniformidad C_u , que sirve para medir y clasificar el grado de distribución de tamaño de las partículas de un suelo y el coeficiente de curvatura C_c , que ayuda en la interpretación de cómo esta graduado un suelo, entregando valiosa información sobre el equilibrio entre diversos tamaños.

2.12 Condiciones climáticas que favorecen la meteorización

La región del Bio Bio, corresponde a una región de clima templado cálido, con estación seca de 4 a 5 meses. El régimen térmico es suavizado por la acción moderadora que ejerce el mar, manifestándose en leves amplitudes diarias y anuales. La hidrografía se caracteriza por un régimen nivopluvioso. La zona de estudio presenta un promedio anual de temperatura de 12°C y precipitaciones de 1000mm. (Dirección Meteorológica de Chile: Departamento de Meteorología y Climatología, 2001)

Según lo expuesto por Cooke y Doornkamp, (1990), la zona de estudio por sus características climatológicas, presentaría una moderada meteorización química por las condiciones pluviométricas anteriormente expuestas, (Figura 7).

Si consideramos la variable clima de la zona, señaladas anteriormente, de donde se extrajeron las muestras supuestamente alteradas, debemos señalar que las posibles alteraciones se deben a razones de una moderada meteorización química; además debemos considerar que el del sector El Morro de Lota se encuentra a orillas del mar, lo que genera una mayor humedad, la cual está presente durante todo el año. Por otro lado, la muestra supuestamente no alterada, extraída al interior de mina, no ha sido sometida algún tipo de precipitaciones y a una temperatura constante de 22°C , por lo tanto, la probabilidad de meteorización química, en esta muestra, es muy baja.

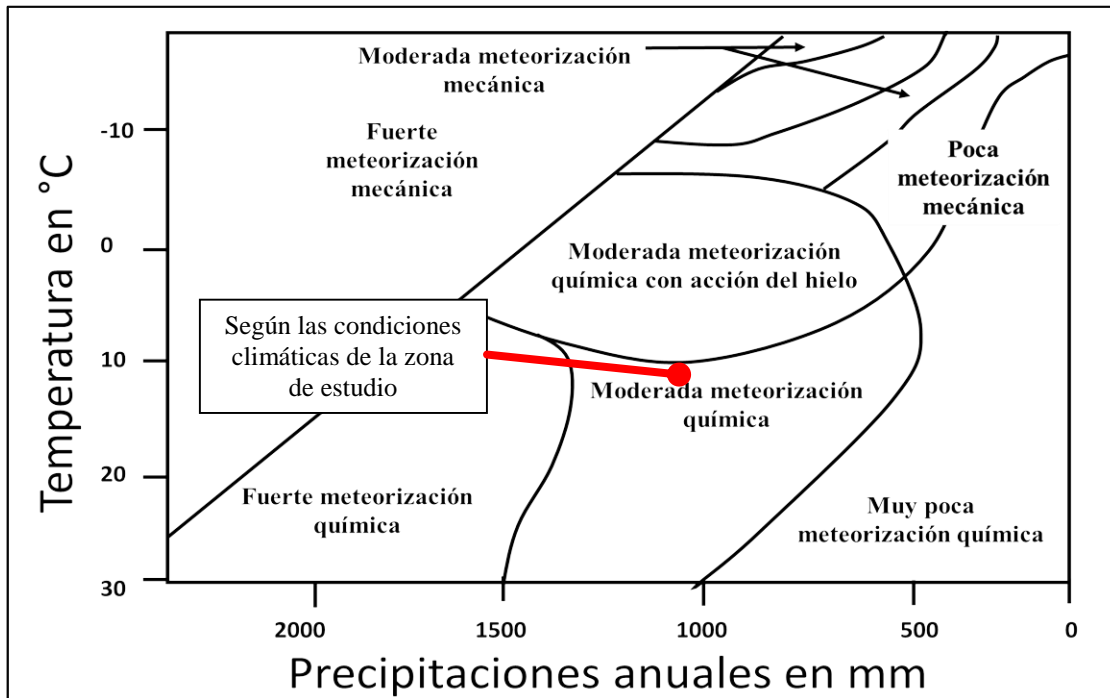


Figura 7: Relación entre precipitación, temperatura medias anuales, tipo y grado de meteorización. (Modificado de Cooke y Doornkamp, 1990).

2.13 Consideraciones para discriminar los resultados obtenidos

Una vez analizadas y obtenidos los resultados de ambas muestras, alteradas y no alteradas de tosca, podemos comprobar si las diferencias entre ambas son significativas o poco significativas, para ello se considera lo expuesto en las normas establecidas, donde se precisa el valor de las diferencias aceptable entre muestras, de no estar explicado este punto, se la catalogará según la importancia que genera esta diferencia al resultado, al ser calculado por métodos de estabilidad de taludes.

Según el nivel de confianza que podemos asegurar, que las diferencias entre ensayos, de existir, sólo corresponde cambios producidos por la meteorización química de oxidación; por lo que podemos clasificar los resultados como: poco probable, probable o muy probable.

Finalmente si el parámetro comparado no puede ser asociado, por sus características a una comparación, no lo presenta o simplemente no hay diferencia, será calificado como no aplicable.

3 METODOLOGÍA

Para poder medir los cambios geotécnicos que presentan estos depósitos de toscas, en los terrenos ocupados en las antiguas explotaciones carboníferas de la comuna de Lota, es necesario obtener muestras de tosca alteradas y no alteradas que presenten el mismo origen, es decir, mismo manto y cuya diferencia es: una fue depositada en superficie y la otra fue almacenada al interior de la mina.

Para la obtención de muestra de tosca no alterada, se deberá extraer de las dependencias de la mina “El Chiflón del Diablo”, que en la actualidad funciona como una mina abierta al turismo. La muestra será representativa si la humedad que posee corresponde a su génesis y/o al estar en contacto con el aire del interior de la mina. Por lo tanto, su conservación en 100 años es relativamente buena. Si bien es cierto que en la mina existen lugares donde hay filtraciones de agua, producto de fallas geológicas presentes en el sector, se verificó detalladamente, que el

lugar de extracción de la muestra, para este estudio, no presentara estas características. Finalmente la única tosca disponible de esta dependencia es la que pertenece al techo del manto 4.

Para la obtención de muestras alteradas se debe asegurar que las muestras provengan de la explotación del manto 4 y no otros orígenes, además que provengan de las últimas toscas depositadas en sector El Morro. Para comprobar que la muestra obtenida del depósito sector El Morro, pertenezca al manto 4, se deberá clasificar la roca de forma visual si es una arenisca fina o lutitas, ya que las arcillolitas provenientes del manto 5. Finalmente para comprobar que la muestra no presente más de 50 años, esta debe ser tomada en los últimos lugares donde se depositó, siendo la superficie el lugar más indicado.

Cada muestra será sellada en bolsas, para la conservación de su humedad, además los ensayos comenzarán dentro el mismo día, evitando que las muestras no alteradas puedan presentar algún cambio en sus propiedades. Para su análisis, se utilizará el laboratorio de mecánica de suelos, que posee la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Cabe destacar, que sólo serán explicados detalladamente, los procedimientos que difieran de las metodologías de las normas. Tabla 6.

Finalmente se presenta para cada ensayo, los parámetros relevantes que serán utilizados para esta investigación (Tabla 6)

3.1 Granulometrías

Se decidió sólo evaluar la fracción inferior al tamiz de 75 mm, ya que como las piritas pueden ser la responsable de un fraccionamiento del material, así como la degradación de este por la oxidación, no se requiere medir fracciones de tamaño de clastos mayores, de esta forma se disminuye la cantidad de muestra para que sea representativa. El ensayo se apegó a las normas propuestas en el Manual de Carreteras de la Dirección de Viabilidad (2015) y ASTM D 422 – 63 (2002).

Otra aplicación de este ensayo fue la reconstrucción de muestras no alteradas, para que presenten una granulometría igual, para el ensayo de corte directo.

3.2 Humedad

La humedad no será ocupada como parámetro de comparación real, sin embargo es una de las variables principales en este estudio, como se expone en los apartados 2.7 y 2.12. De obtener, el parámetro de humedad de las muestras, serán sometidas a comparación bajo la norma chilena NCh-1515 Of. (1997).

Para controlar esta variable, se utilizó en las muestras alteradas y no alteradas, 10 muestras de alrededor de 200gr, con tamaño de partícula inferior a 75mm.

3.3 Clasificación USCS

Si bien esta clasificación fue creada para suelos transportados, por su forma práctica de clasificación se aplicará, para esta investigación, además, no necesita de algún otro tipo de ensayo, solo los resultados obtenidos por la granulometría y los límites de Atterberg (Tabla N°6).

3.3 Corte directo

En el ensayo de corte directo se consideró la norma ASTM D3080 (2011), donde todos sus parámetros fueron utilizados como medio de comparación principal en este estudio. Sin embargo, para poder observar diferencias entre muestras, se realizaron algunos cambios en el procedimiento. Se ensayaron rocas de toscas alteradas y no alteradas, con la finalidad de tener una muestra representativa y que no presente alguna deficiencia, ya que su dimensión debe poseer el tamaño suficiente para ser cortada y tallada. De esta forma podemos obtener una muestra

de caras bien definidas de 10x10x3 cm. Por otro lado, se buscó que la estratificación de las muestras sea paralela en ambos casos, en favor de la fractura que se producirá en el ensayo. Como el parámetro elegido para la roca es el ángulo de fricción residual, se fracturo la roca con la misma máquina de corte directo a cargas bajas, para no superar el máximo que soporta y de esta forma, no dañarla. Se ocuparon 3 muestras para cada tipo de tosca, obteniendo cinco relaciones diferentes de esfuerzo normal versus corte. La velocidad para este ensayo fue conservadoramente elegida, siendo de 0,01mm/min.

Por otro lado, se ensayaron muestras de suelos con una granulometría menor a 10mm, respetando lo señalado en la norma ASTM D3080 (2011), sin embargo, una de ellas fue reconstituida, como se explica en el apartado 3.1.2, preparándose 5 muestras de 650 gr para muestras alteradas y 620 gr para muestras no alteradas, las masas fueron calculados de las densidades obtenidas, asegurándose que las granulometrías fuesen iguales y que no queden fracciones de finos en los recipientes.

Un mayor contenido de material, en densidades relativas bajas, provocan un mayor volumen, se puede generar, problemas de desborde de la caja de corte, dificultando el montaje y la saturación. Por un déficit de material, en densidades relativa altas, se pueda generar problemas en la maquinaria y los resultados, cuando se aplica la tensión normal para ser consolidadas, se disminuye su volumen, haciendo que la piedra porosa de la parte superior de la muestra, baje y logre quedar donde se esté provocando la falla.

En cuanto a la velocidad del ensayo, se calculó por la consolidación según Casagrande (1936), obteniendo el parámetro de t_{50} , cuyo resultado de cálculo final de velocidad fue alrededor de 0,09mm/min, sin embargo, se ensayó a 0,01mm/min, de esta forma se actuó conservadoramente asegurándose que dicho ensayo se realice en un estado drenado. Las otras etapas del ensayo, se ajustaron a lo indicado en la norma ASTM D3080 (2011), procediendo a evaluar el ángulo de fricción interna máxima y la cohesión.

Tabla 6: Resumen de las normas utilizadas para los ensayos, los parámetros y datos relevantes para la investigación que se obtendrán de cada uno.

| Tipo de Ensayo | Norma | Parámetros |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Contenido de humedad | Cálculo de humedad, mediante norma chilena NCh-1515 Of. 1997. | Contenido de humedad |
| Granulometría | Tamaño de partículas, mediante el Manual de Carreteras de la Dirección de Viabilidad (2015) y ASTM D 422 – 63. | Curva granulométrica Coeficiente de uniformidad “cu” Coeficiente de curvatura “cc” |
| Límites de Atterberg | Límite Líquido (LL), norma chilena NCh-1517/1 Of. 1979 y ASTM D 4318 – 00 (2000) Límite Plástico (LP), norma chilena NCh-1517/2 Of. 1979 y ASTM D 4318 – 00 (2000) | Límite líquido Límite plástico |
| Gravedad Específica | Cálculo de la Gravedad Específica, norma chilena NCh-1532 Of.1980 y ASTM D 854 – 02 (2009) | Gravedad específica |
| Clasificación USCS | Tipo de suelo, a través del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) ASTM D 2487-11. | Clasificación del tipo de suelo |
| Corte Directo | Cálculo de resistencia al corte y ángulo de fricción, norma ASTM D3080/D3080M-11. | Cohesión, Ángulo de fricción interna y residual. |

3.4 Gravedad específica

Gran parte de todos los métodos, que evalúen la estabilidad de un talud, necesitaran la densidad específica del material que se está evaluando. De esta manera podemos apreciar claramente los índices de vacíos, masas involucradas, volúmenes, etc. Por esta razón es fundamental poner cuidado en los cambios de parámetros para un futuro cálculo de estabilidad.

El procedimiento elegido fue de la norma chilena (NCh-1532 Of.1980) y (ASTM D 854 – 02 2009), aunque para la fracción de suelos, se procedió de forma normal, obtiene una apreciación más global. En cuanto a las rocas, se procedió a fractúralas para que tuviesen un tamaño de partículas adecuadas para el ensayo.

4. RESULTADOS

4.1 Granulometría

La muestra alterada pertenecientes al depósito del sector El Morro, presentan mayor porcentaje de fino que la muestra homóloga del interior de la mina; esto puede ser explicado por una mayor presencia de fuerzas mecánicas, que pudieron fragmentar más los clastos, así como la presencia de pirita, es decir, la misma composición de la muestra, más factores ambientales de superficie, provocaron una meteorización química de oxidación, transformando la granulometría de la muestra. Sin embargo, cabe destacar que las curvas granulométricas presentan un patrón muy similar y la diferencia entre ambas es leve, además no se logró aislar todas las variables para poder demostrar de forma categórica, que la meteorización es la responsable de estos pequeños cambios. Por lo tanto, la diferencia entre muestras obtenidas de la granulometría como un medio de comprobar cambios geotécnicos, provocados por la meteorización química de oxidación es catalogada como poco probable y poco significativa (Figura 8); (Tabla 7).

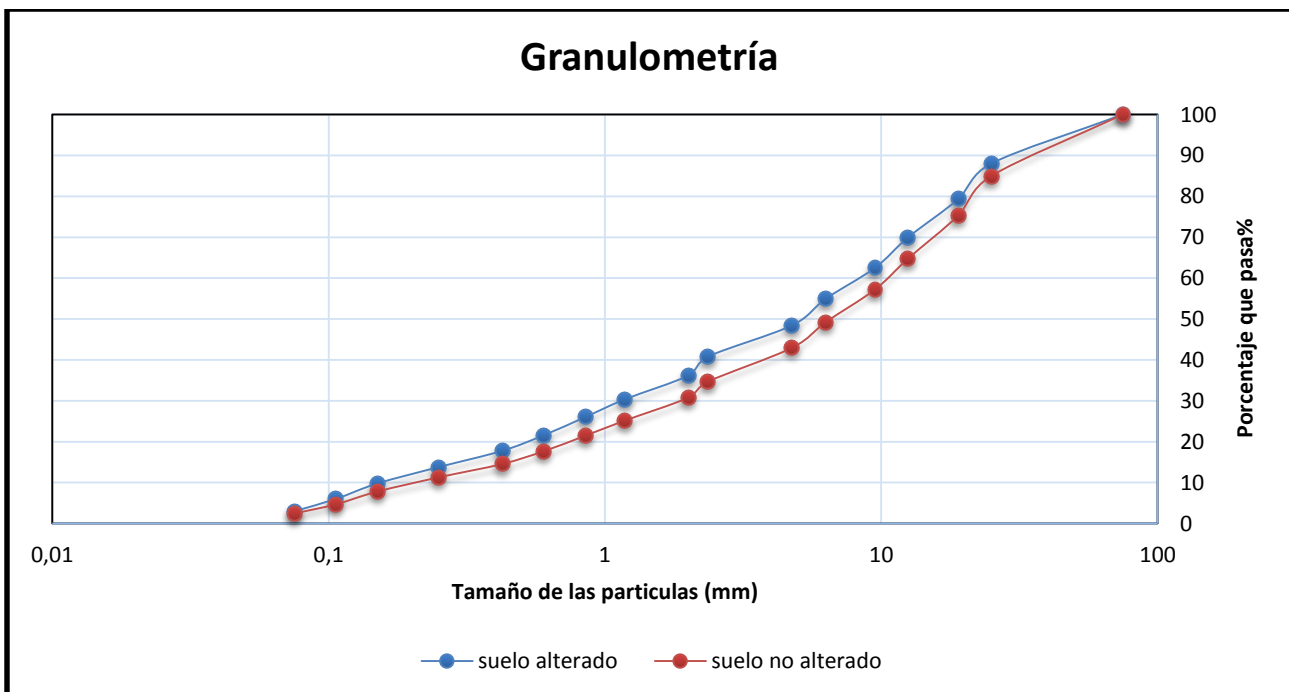


Figura 8: Curva granulométrica para fracción menor a 75mm, para suelos alterados y no alterados.

Tabla 7: Parámetros granulométricos obtenidos de muestras alteradas y no alteradas de tamaños menores a 75mm.

| | D10 | D30 | D50 | D60 | cu | cc |
|---------------------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| Muestra alterada | 0,245 | 1,15 | 5,078 | 8,28 | 7,22 | 0,649 |
| Muestra no alterada | 0,18 | 1,86 | 6,55 | 10,51 | 5,65 | 1,82 |

4.2 Cálculo de humedad

Es claro notar que la humedad presente en las muestras alteradas es mucho mayor, que las muestras no alteradas. Aunque esta diferencia no puede ser interpretada como efecto de la meteorización química, si es importante para explicar por qué se produce, (Tabla 8)

Tabla 8: Humedades obtenidas el 23 de junio de 2017.

| Tipo de muestra | Suelo Alterado | Suelo No alterado |
|---------------------|----------------|-------------------|
| Humedad \bar{x} % | 13,23 | 0,95 |
| Humedad St % | 1,29 | 0,005 |

Sin embargo la humedad no fue considerada como un parámetro comparativo, es decir, debido a que este parámetro no demuestra algún cambio geotécnico, por lo tanto será catalogada como no aplicable en el presente estudio.

4.3 Límites de Atterberg

Según las normas utilizadas de la Tabla 6, las muestras ensayadas no presentan ninguno de estos parámetros, principalmente esto se explica por tener una granulometría mayormente gruesa. Por lo tanto, como medio de prueba para aprobar la tesis será catalogada como no aplicable.

4.4 Clasificación USCS

Según la clasificación de suelos USCS, en ambas muestras más del 50% de la fracción, es mayor que el tamaño del tamiz N°.4 (4,75mm) por esto, las muestras se considera como grava, además menos del 5% pasa por la malla N°.200 (0,075mm). Sin embargo para la muestra alterada con Cc, fuera del rango 3 y 4 y Cu mayor que 4, al no cumplir ambos rangos, es clasificada la muestra como GP, es decir, grava bien graduada, con presencia de arenas con poco o nada de finos. A diferencia de la muestra no alterada, que presenta Cc =1,82 y Cu 5,65, al cumplir ambos rangos se considera como GW, es decir, grava mal graduada, con presencia de arenas con poco o nada de finos. Sin embargo, al igual que la granulometría será catalogado como poco probable y poco significativa.

4.5 Densidad de partículas sólidas

Según las densidades obtenidas, entre las muestras de suelo no alterada es 0,0642 gr/cm³ mayor que su contraparte alterada. Las muestras de rocas, no alterada es 00584 gr/cm³ mayor que la roca no alterada, esto difiere según lo expuesto en el apartado 2,7, explicando que la oxidación provoca aumento en la densidad, (Tabla 9).

Según la norma NCH1532, sobre la densidad de partículas sólidas, considera lo siguiente: que al ensayar dos muestras de igual origen se puede aceptar un error menor al 3% de diferencia, las muestras alteradas y no alteradas, presentan una diferencia menor a 2,5 %, por lo cual para este ensayo, no se caería en un error en asumir que no

existe cambio real en la densidad o simplemente que el material es el mismo. Por esto como variable será catalogada como probable, pero poco significativa.

Tabla 9: Densidad de partículas sólidas para suelo y roca no alterada y suelo y roca alterada.

| Tipo de Muestra | Suelo Alterado | Roca Alterada | Suelo No Alterado | Roca No Alterada |
|----------------------------------------------------------|----------------|---------------|-------------------|------------------|
| Densidad partículas sólidas \bar{X} gr/cm ³ | 2,4948 | 2,5106 | 2,559 | 2,569 |
| Densidad partículas sólidas St gr/cm ³ | 0,0698 | 0,061 | 0,0341 | 0,331 |

4.6 Cohesión, ángulo de fricción interna y residual

Los 3 parámetros señalados presentaron diferencias entre muestras, como podemos observar en el gráfico de la Figura 9 y la Tabla 10; el ángulo de fricción interna que presenta los suelos de toscas de muestras alteradas, es significativamente menor a las muestras de suelo de toasca no alteradas, siendo 5,2° su diferencia. Para las muestras de rocas, el ángulo de fricción interna residual presentó diferencias significativas, siendo la muestra no alterada de 4,7°, mayor a los resultados que la muestra no alterada.

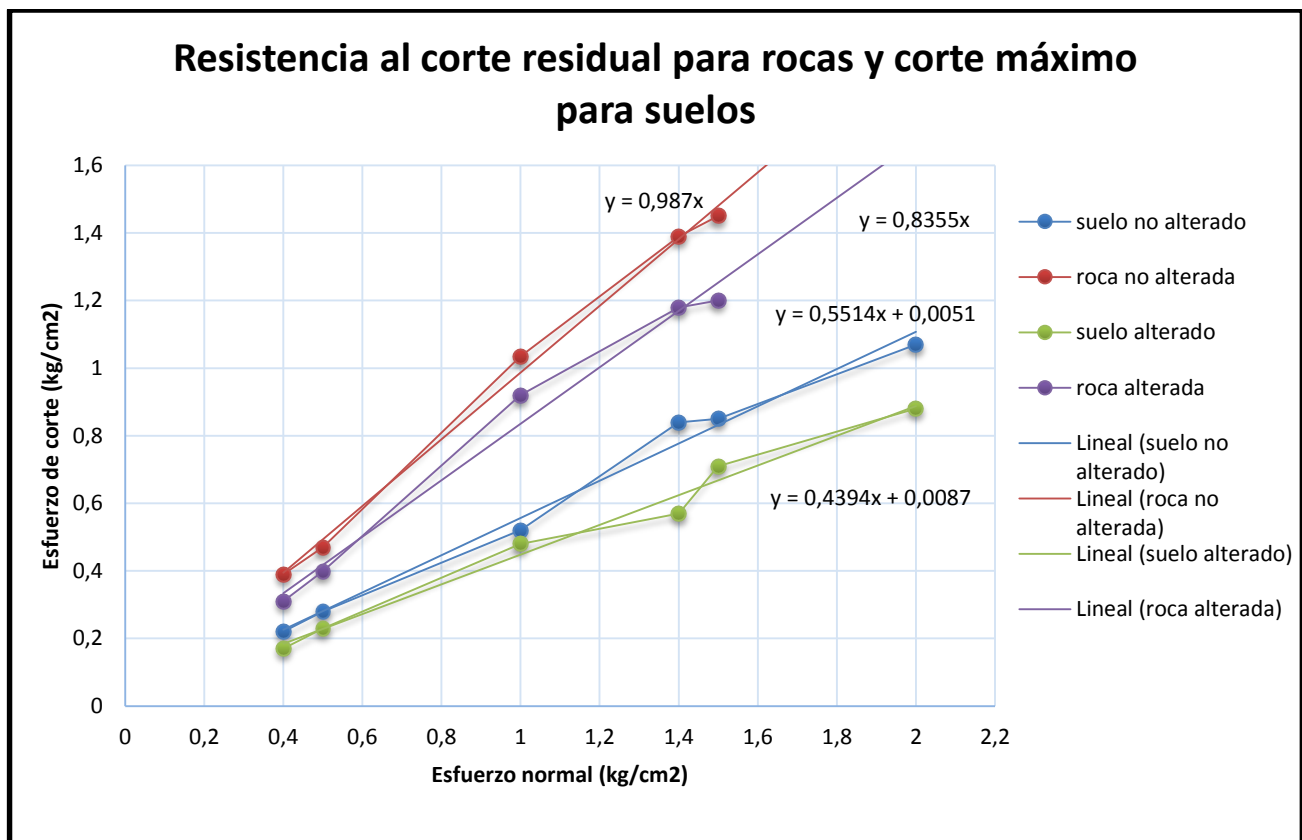


Figura 9: Gráfico de resistencia al corte para de muestras de rocas y suelos alterados y no alterados.

**Tabla 10:** Valores finales de las muestras alteradas y no alteradas tanto para rocas y suelos.

| | Ángulo de fricción interna Cohesión (Kg/cm ²) | Ángulo de fricción residual Cohesión (Kg/cm ²) | Cohesión (Kg/cm ²) |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Roca alterada (Depósitos de toscas El Morro) | - | 39,9 | - |
| Roca no alterada (Interior de la Mina Chiflón del Diablo) | - | 44,6 | - |
| Suelo alterado (Depósitos de toscas El Morro) | 23,7 | - | 0,0087 |
| Suelo no alterado (Interior de la Mina Chiflón del Diablo) | 28,9 | - | 0,0051 |

La cohesión para ambas muestras, son muy bajas; esto puede ser explicado por las características de su granulometría, aunque presentan granulometrías levemente diferentes; la muestra alterada se reconstituyeron exactamente igual con respecto a las proporciones de los tamices, a la muestra no alterada; esta reconstitución no fue capaz de generar las condiciones para los clastos inferiores a la malla N°200. La oxidación va degradando más los componentes que contienen material carbonoso, entonces podemos señalar que el poco material es inferior a la malla N°200 de ambas muestras; para la tosca alterada puede ser más fino, arrojando resultados que evidencia una diferencia de 0,36gr/cm² en su cohesión; sin embargo al ser valores tan bajos, podría ser explicado por cohesión aparente.

Finalmente evaluando la confiabilidad de estas diferencias entre los resultados que presentaron las muestras alteradas y no alteradas producto de la meteorización química de oxidación, la cohesión será considerada como, poco probable y poco significativa; sin embargo, a los valores del ángulo de fricción interna y residual, presentan la diferencia más clara de este estudio, sumado a su relevancia que presentan en los métodos matemáticos que evalúan estabilidad de taludes, por esto, ambos parámetros serán considerado como muy probables y significativos.

4.7 Resultado de las comparaciones de cada parámetro estudiado

Finalmente el nivel de confiabilidad como medio de prueba para comprobar una variación de cada parámetro geotécnico evaluado, sea producidos por meteorización química de oxidación.

La humedad y los Límites de Atterberg, no fueron aplicables. Para la granulometría, clasificación USCS y la cohesión, en los ensayos, presentaron diferencias, sin embargo, estas fueron muy pequeñas, y la probabilidad que otros factores pudieron influir, es alta, por es esto fueron catalogados como poco probables y poco significativas.

La densidad de partículas sólidas, presento diferencias consistentes, sin embargo, estas fueron pequeñas y contrarias a lo esperado, por esto, se catalogó como, probable pero poco significativa.

Los dos parámetros que sus diferencias fueron claras y determinantes, fueron los ángulos de fricción interna y residual, que presentaron valores esperados, por esto fueron catalogadas como, muy probables y significativas (Tabla 11).

Tabla 11: Valoración finales de las muestras alteradas y no alteradas tanto para rocas y suelos.

| Parámetro Estudiado | Nivel de confiabilidad como medio de prueba para comprobar una variación de parámetros geotécnicos, producidos por meteorización química de oxidación. |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Granulometría | Poco probable y poco significativa |
| Humedad | No aplicable |
| Límites de Atterberg | No aplicable |
| Clasificación USCS | Poco probable y poco significativa |
| Densidad de partículas sólidas | Probable pero poco significativa |
| Cohesión | Poco probable y poco significativa |
| Ángulo de fricción interna | Muy probable y significativa. |
| Ángulo de fricción residual | Muy probable y significativa |

5. CONCLUSIÓN

La recopilación de antecedentes históricos, geográficos, geológicos, geoquímicos, climáticos y geotécnicos fueron información, científica y técnica suficiente para establecer las bases necesarias que permitieron fundamentar la presente investigación.

Según las características del depósito de toscas, se eligieron parámetros geotécnicos, más ocupados comúnmente en los métodos que evalúan la estabilidad de los taludes, la cohesión, ángulo de fricción interna y residual y densidad. Además de otros parámetros que son importantes, para la investigación como es la granulometría, clasificación USCS y humedad.

El muestreo fue el acertado, obteniendo una muestra, del interior de la mina “El Chiflón del Diablo”, cuyo único manto disponible es el manto 4. Esta muestra que no presento señales de algún tipo de alteración, de este modo se pudo obtener una muestra del depósitos de toscas del sector El Morro, que pertenecieron al manto 4, siendo posible su distinción, por todos los antecedentes anteriormente mencionados, la cual presentaba meteorización química de oxidación, lo que nos permitió realizar los ensayos comparativos relevantes para esta investigación.

Comprender su composición y condiciones climáticas actuales que presenta el sector para demostrar que el material es propenso alterarse. La tosca estudiada pertenece a la formación geológica de Curanilahue, específicamente el Miembro Lota, perteneciente al manto 4 del interior de la mina “El Chiflón del Diablo”. Único manto disponible para poder muestrear. Esta tosca es una arenisca fina, con contenido de carbón cuyo componente principal es el carbono, el cual es propenso a alterarse por las condiciones climáticas que presenta el sector con un promedio de temperaturas de 12°C y precipitaciones de alrededor de 1000 mm anuales, que según la relación de precipitaciones y temperaturas de Cooke y Doornkamp (1990), presenta una mediana meteorización química. Por otro lado, La tosca presenta contenidos de pirita, que favorece esta meteorización, provocando el color rojizo anaranjado, característico del depósito de toscas del sector El Morro.

Las muestras fueron ensayadas con éxito, para lograr obtener los resultados de todos los parámetros necesarios, los que fueron debidamente comparados y evaluando. De esta manera pudimos obtener el nivel de confiabilidad como medio de prueba para comprobar una variación de parámetros geotécnicos, producidos por meteorización química de oxidación, (Tabla 11). Además, se pudo obtener como resultados de laboratorio, diferencias significativas, en los ángulos de fricción interna y residual, sumada a los pequeños cambios en la densidad, granulometría y clasificación.

De lo anterior podemos afirmar que la investigación realizada nos entregó resultados suficientes para concluir que los cambios producidos por meteorización química en los depósitos más superficiales de toscas del sector El

Morro, después de 40 años expuestos a condiciones ambientales, presentaron cambios geotécnicos significativos, lo que puede provocar un empeoramiento considerablemente en la estabilidad del terreno si se considera la acumulación de tosca como un Talud.

6. RECOMENDACIONES

Una vez acabada la investigación sugerimos las siguientes recomendaciones para el sector El Morro de Lota y otras comunas:

1. Se hace necesario un estudio previo de estabilidad de talud para el depósito de tosca en el sector por dos razones:
En primer lugar, por el cambio en las propiedades geotécnicas que presenta la tosca al ser expuesta a condiciones ambientales, lo cual hace que el terreno disminuye su estabilidad, debido principalmente a la disminución en los ángulos de fricción máxima y residual de los depósitos de toscas que fueron meteorizados.
En segundo lugar, sumado a la exposición de alrededor de 40 casas que existen en el lugar, puede generar condiciones potencialmente peligrosas.
2. La alteración de la tosca expuesta al medio ambiente puede presentar riesgos para las personas en cuanto a su salud, ya que pueden contaminar las aguas y los suelos, debido a que estos restos de toscas puedan alterarse, liberando metales pesados, es decir, puede lixiviar a napas subterráneas y/o al mar, metales que dañen la salud humana, como por ejemplo: Hierro, Vanadio, Germanio, Cobre, Cobalto y Niquel basado en Collao (1984), por esto se hace necesario un estudio de impacto ambiental.
3. No sólo la comuna de Lota presenta estos depósitos de toscas, sino que todas aquellas comunas que han explotado por años el carbón, como es el caso de: Curanilahue, Coronel, Lebu y entre otras. Algunas de estas comunas poseen depósitos más extensos, como Coronel, por esto se hace necesario fomentar e invertir en estudios e investigaciones presentadas en las recomendaciones 1 y 2, las cuales debe verificar el estado en que se encuentran estos depósitos; de esta manera podemos anticiparnos a que futuras autoridades y/o familias construyan viviendas sin considerar los factores anteriormente señalados.
4. La tosca estudiada procede del manto 4, la cual poseía un menor contenido de azufre en comparación a los otros mantos explotados, por lo tanto, existen depósitos que provienen de mantos con cinco veces más cantidad de azufre que el manto 4, lo que puede generar una combustión espontánea si se dan las condiciones necesarias; por lo tanto, se hace necesario un estudio que evalúe las temperaturas de estos depósitos a través de termometría, regulando la instalación de cañerías de gas, ubicación de gasolineras, etc.
5. Es necesario que las municipales de las comunas de Lebu, Curanilahue, Lota y Coronel, consideren en su Plan Regulador áreas territoriales que poseen depósitos de toscas, tomando en cuenta los puntos tratados en las recomendaciones 1, 2, 3 y 4.

7. REFERENCIAS

Astorquiza, O. y Galleguillos, O. (1952). Cien años del Carbón de Lota. Cia. Carbonífera e Industrial de Lota, Editorial Zig – Zag S.A.1952.

ASTM D 388-17 (1998). Standard Classification of Coals by Rank, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D 422 – 63 (2002). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils1

ASTM D 854 – 02 (2009). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer1

ASTM D 2487 (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), West Conshohocken, United States, ASTM international.

- ASTM D 3080** (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained. West Conshohocken, United States, ASTM international.
- ASTM D 4318 – 00** (2000). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, United States, ASTM international.
- Barnes, G. E.** (1991). “A simplified version of the Bishop and Morgenstern Slope-Stability Charts”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, No.4, pp. 630-632.
- Bishop, A.W. y Morgenstern, N.** (1960). “Stability Coefficients for Earth Slopes”. Geotechnique Vol 10, No. 4.,
- Blanco, E., Bonilla, R. y Donoso, C.** (1974). Proyecto Carampangue- Ramadilla. Informe inédito
- Casagrande, A.** (1936). The determination of pre-consolidation load and its practical significance. In: Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering
- Charles, J. y Soares M.,** (1984). “Stability of compacted rockfill slopes”, Geotechnique, Vol. 34, No.1, pp. 61-70.
- Chen, W. y Giger M.** (1971). “Limit analysis of slopes”, Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, Vol. 97, No. SM-1, January, pp.19-26.
- Dirección Meteorológica de Chile: Departamento de Meteorología y Climatología** (2001). Climatología Regional, p. 28. Recuperado de http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Climatologia_regional.pdf
- Collao, S.,** (1984). Distribución de cenizas azufre y elementos de carbón del Miembro Lota de la Formación Curanilahue. Geología y recursos minerales de Chile, Editorial de la Universidad de Concepción. Edición. Parte B. Suarez, J., (2012). Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales, cap. 4 - 2002.
- Cousin, B.** (1978), “Stability charts for simple earth slopes”, Journal of Geotechnical division, ASCE, Vol. 104, No. GT-2, February, pp. 267-279.
- Casas, E., Blandón, A y Molina, J.** (2014). Evaluation of parameters to determine the degree of coal dust explosibility, boletín de ciencias de la tierra: Universidad Nacional de Colombia.
- Cespedes, S.** (1977). Información Geológica del área de Arauco ENAP.
- Cooke, R. y Doornkamp, J.** (1990). Geomorphology in environmental management, 2nd edition, Oxford: Oxford University Press, UK.
- Frutos, J. y Tobar, A.** (1975). Evolution of the southwestern Continental margin of south America. In: K.S.W. Campbell (editor), third International Gondwana Symposium, Canberra, Australia (1973). Gondwana Geology. Australian National University Press, Canberra, pp 565-577
- Flores, H., Pineda, V., Collao, S., y Oyarzun, R.** (1984). Geología y Recursos minerales de Chile, Editorial de la Universidad de Concepción.
- Ferraris, F. y Bonilla, R.** (1981). Hoja Arauco-Lebu, Región del Biobío, 1: 250.000. Mapa Geológico Preliminar N° 6, 26pp, Sernageomin, Santiago.
- Freudlund, D.** (1995). “The scope of unsaturated soil mechanics: An overview” Proceedings of the first international conference on unsaturated soils, París pp. 1155-1177.
- Frutos, J.** (1967). Palinología de los niveles carboníferos del Terciario de Arauco. Tesis de prueba para optar al título de Geólogo. Depto. De Geología. Fac. Cs. Fis. y Mat. U. de Chile.
- Frutos, J.** (1980). Andean tectonics as a consequence of a sea-floor spreading. Tectonophysics. 70, T21-T32
- García, F.** (1968). Estratigrafía del Terciario de Chile Central. En Terciario de Arauco. (G. Cecioni, Ed.) 1968. Ed. Andres Bello. Santiago, pp.25-58.

- Grez, E.** (1979). Estratigrafía, Paleografía y Estructura del Yacimiento Carbonífero Submarino de Lota-Schwager, Departamento de Geología, Empresa Nacional del Carbón, Chile, 25 de abril de 1979.
- Hoek, E. y Bray J.** (1977). "Rock slope engineering". London: Institute of mining and metallurgical engineering
- Hunter, J. y Schuster R.** (1968). "Stability of simple cuttings in normally consolidated clays", Geotechnique, Vol. 18, No. 3, pp. 373-378
- Intituto Nacional de Investigación Geológico-Mineras** (1988). Métodos de análisis para carbón y coke, Bogotá Colombia.
- Janbú, N.** (1968). "Slope stability computations". Soil mechanics and foundation engineering report. Technical University of Norway, Trondheim.
- Laboratorio oficial de Madrid, España** (1992). Estudio de las características del calentamiento y combustión espontánea en la capa de las hullas subituminosas.
- Lee, K. y Seed, H.** (1967). Drained strength characteristics of sands. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 93(6):117-141, Nov. 1967.
- Llorente, M.** (1999). Geología del carbón y el petróleo. Ingeniero ambiental, España. Consultado el 11/12/2010. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4017/geologia%20del%20petroleo.pdf>.
- Machado, M.** (1905). El Carbón de Chile y su distribución geográfica.
- Mejuto, M.** (2011). Afectación de la minería del carbón en las propiedades Físicas y Químicas de los suelos de la Cuenca Hidrográfica del Río Rodrigo (El Bierzo, León). Memoria para optar al grado de doctor, Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas, Madrid, 2011
- Mitchell, J.** (1993). Fundamentals of Soil Behavior, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993, 437 p.
- Muñoz Cristi, J.** (1946). Estado actual del conocimiento sobre la Geología de la Provincia de Arauco. An. Fac. Cs. Fis. Mat., año 3, Vol 3, pp. 30-63.
- Muñoz Cristi, J.** (1956). Chile. In Handbook of south American Geology. Geol. Soc. Amer. Mem. 65, pp. 187-214
- Muñoz Cristi, J.** (1968). Contribución al conocimiento geológico de la región situada al Sur de Arauco y participación del material volcánico en los sedimentos eocenos. En Terciario de Arauco (G. Cecioni, Ed.). 1968. Ed. Andres Bella. Santiago, pp 63-94.
- Norma Chilena NCh-1515** (1997). Mecánica de suelos - Determinación de la humedad. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- Norma Chilena NCh-1517/1** (1979). Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 1: Determinación del límite líquido. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- Norma Chilena NCh-1517/2** (1979). Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 2: Determinación del límite plástico. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- Norma Chilena NCh-1532** (1980). Mecánica de suelos - Determinación de la densidad de partículas sólidas. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- Pineda, V.** (1983). Evolución Paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior-Terciario. fac. Cs. Fis. Y Mat. U de Chile. Santiago.
- Pineda, V.** (1984) Evolución paleogeográfica de la cuenca sedimentaria Cretácico-Terciaria de Arauco. Geología y recursos minerales de Chile, Editorial de la Universidad de Concepción. Edición. Parte B.
- O'Connor, M. y Mitchell,** (1977). "An extension of the Bishop and Morgenstern slope stability charts" Canadian Geotechnical Journal. Vol. 14 No.1 pp. 144-151.

- Quinzio, A., Collao, S., Gonzalez, G. y Ceccioni, A.** (2000-2001). Proyecto ERPLAC. Evaluación de los recursos metálicos de la Región del Biobío. Fondo Nacional del desarrollo Regional. Bip N°20107632-0.
- Spencer, E.** (1967). “A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces”. Geotechnique, Vol 17 pp 11-26.
- Steinmann, G.** (1895). Die Cephalopoden der QuiriquinaSchichten. – Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 10: 64-94.
- Suarez, J.** (2002). Deslizamientos: análisis Geotécnico. T1, cap.4.
- Travera, J.** (1942). Contribución al estudio de la Estratigrafía y Paleontología del Terciario de Arauco. An. I Congr. Panam. Ing. Min Geol. Santiago. T2, pp. 580-632.
- Vallejos, P.** (2017). Comunicación personal con don Patricios Vallejos, Jefe de Área Mina Chiflón del Diablo. Entrevista realizada el 12 de agosto de 2017.