

ASPECTOS GEOTÉCNICOS DE ROCAS BLANDAS SINGULARES

Sebastián Maureira (1); David Castro (2); Ramón Verdugo (3)

(1) CMGI Ltda.

(2) Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO

(3) CMGI Ltda.

smaureira@cmgi.cl; dcast020@codefco.cl; rverdugo@cmgi.cl

Resumen

En el presente estudio se analiza el comportamiento de una unidad de roca que al estar en contacto con agua sufre la disgregación y desintegración total, generando un material que desde cualquier punto de vista ingenieril corresponde a suelo. La roca analizada se encuentra en el sector cordillerano de la Sexta Región.

Para evaluar el cambio en las propiedades geomecánicas de la roca descrita, se llevó a cabo un programa de ensayos de laboratorio que consideró la ejecución de ensayos de compresión utilizando colpas de roca en condición de humedad natural y saturada. Adicionalmente, se ejecutaron ensayos de hinchamiento libre, presión de hinchamiento y de difracción de rayos X.

Los resultados obtenidos indican que el principal efecto del agua sobre la roca analizada es la de gatillar una tendencia al hinchamiento. Este fenómeno a su vez genera la destrucción de su estructura inicial con la pérdida de cohesión del material, lo que se traduce en una importante disminución de su resistencia y rigidez.

El no identificar la ocurrencia de este fenómeno podría ocasionar problemas de diseño en obras de ingeniería, por lo cual su reconocimiento y adecuada caracterización es de gran importancia en la práctica de la ingeniería geotécnica.

Palabras-Clave: Hinchamiento de Rocas, Degradación de Resistencia, Rocas Disgregables.

Abstract

The present study focuses on the behavior of a rock unit encountered on the Andean area of the Sixth Region of Chile, which suffers complete disintegration when in contact with water, creating a material that, from any point of view, corresponds to soil.

A program of laboratory tests, consisting in uniaxial and triaxial compression tests, was conducted on rock samples with natural moisture and fully saturated, in order to assess the geomechanical properties of the rock described as a result of the interaction with water. Additionally, the laboratory testing program considered free swelling and swelling pressure tests, as well as X-ray diffraction tests.

The results obtained indicate that the main effect of water on the analyzed rock is to trigger a tendency to swell. Consequently this phenomenon is the responsible of the destruction of its initial structure and the complete loss of its cohesion, leading to a significant decrease in its strength and stiffness.

If the geotechnical characterization does not identify this phenomenon it may lead to severe design problems. Accordingly its recognition and adequate consideration is of utmost importance in the practice of geotechnical engineering.

Keywords: Swelling Rocks, Degradation of Strength.

1 Introducción

En la práctica de la ingeniería civil, usualmente se asume que las características geotécnicas de la roca intacta, en términos de resistencia y deformabilidad, se mantienen invariables frente a cambios de humedad. Sin embargo, existen rocas singulares que presentan una importante degradación de sus propiedades al ser expuestas al contacto con agua.

El fenómeno de degradación de la calidad geomecánica de rocas por cambio de humedad que se reporta en la literatura técnica se asocia a procesos de incremento de volumen o hinchamiento, generados principalmente por la hidratación de minerales de arcilla contenidos en la matriz rocosa.

En el presente estudio, se analiza el comportamiento de una unidad de roca que al estar en contacto con agua sufre la disgregación y desintegración total, transformándose en suelo. La unidad de roca corresponde a una brecha volcanoclástica perteneciente a la formación Farellones, existente en el sector cordillerano de la sexta región.

Para evaluar el cambio en las propiedades geomecánicas de la roca descrita, se llevó a cabo un programa de ensayos de laboratorio cuyos resultados se presentan y discuten en el presente artículo.

2 Marco Geológico del Área

El sector en estudio se ubica en la cordillera principal de los Andes Centrales, a aproximadamente 30 km al Nor-Este de la ciudad de Rancagua, en la sexta región del país.

La geología regional indica el afloramiento de potentes secuencias estratificadas de rocas volcánicas intercaladas con secuencias sedimentarias (marinas y continentales) depositadas desde el Triásico Superior. Estas unidades han sido intruidas por cuerpos hipabisales y plutónicos Cenozoicos. En la Fig. 1 se presenta el mapa geológico regional desarrollado por Charrier et al [1], donde se indica la ubicación aproximada del área en estudio.

La unidad superficial de roca en el área en estudio pertenece a la Formación Farellones, cuya edad se estima del Mioceno Superior. Esta formación, definida por Klohn [2], es principalmente volcánica y se compone por una potente unidad de sedimentitas clásticas terrígenas, lavas andesíticas, riolíticas, y basálticas, y rocas piroclásticas alternadas con sedimentos derivados de la descomposición de las rocas efusivas y depósitos lagunares, que consisten en areniscas, lutitas, tufita y capas delgadas de caliza. El espesor de esta unidad es altamente variable, alcanzando un valor aproximado de 2400 m en el área de estudio [3].

La formación Farellones es reconocida, por diversos autores [2] [4] [5], formando una extensa franja longitudinal entre los 31°30' y los 34°45' LS.

Los intrusivos presentes en el sector en estudio poseen diferente composición, textura, edad y extensión. Se reconoce la existencia de al menos cinco franjas de intrusivos agrupados en complejos ígneos intrusivos del Paleogeno-Neogeno (Oligoceno Superior al Mioceno Superior). Estos cuerpos corresponden a intrusivos de carácter plutónico e hipabisal, siendo los tipos litológicos más comunes granodioritas de hornblenda y biotita, pórfidos dioríticos y andesíticos, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos [6].

Cuerpos menores reconocidos en la región corresponden principalmente a stocks, apófisis, diques y filones consistentes en rocas faneríticas y subordinadamente afaníticas y brechas, entre los que se han reconocido granitos, granodioritas, tonalitas monzonitas cuarcíferas y dioritas cuarcíferas [3].

Las rocas en estudio corresponden esencialmente a brechas piroclásticas, aglomerados y brechas tufáceas, de color en general gris, con algunas intercalaciones de lavas andesíticas y brechas volcánicas. Las brechas son masivas, mientras que las andesitas poseen un diaclasamiento columnar intenso. Estas rocas presentan grados de meteorización variable entre no meteorizadas y poco meteorizadas a muy meteorizadas en los niveles superiores de la Formación Farellones.

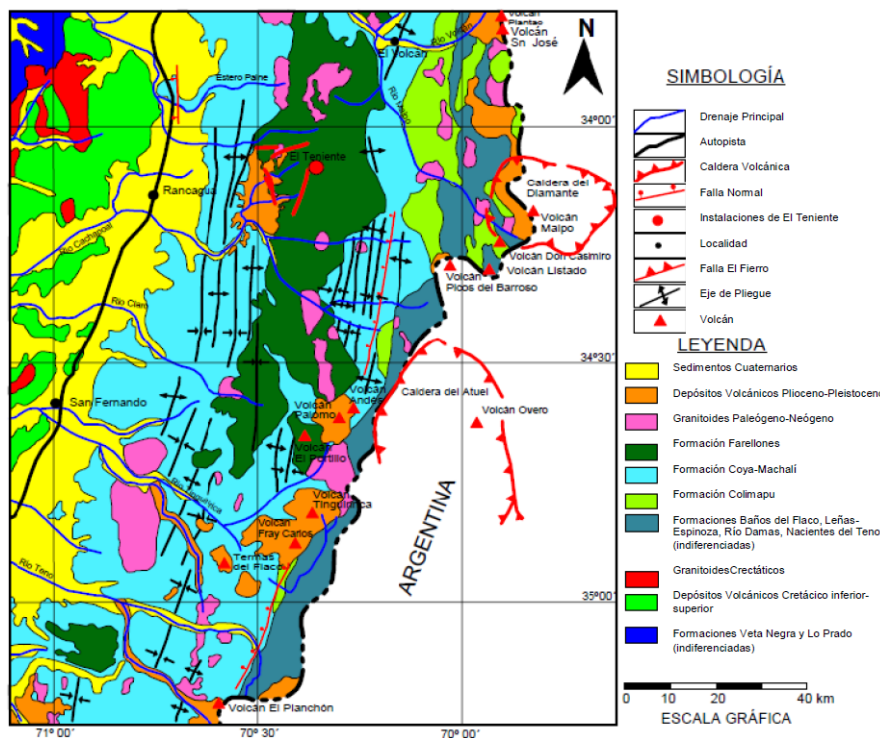


Fig. 1 – Mapa geológico regional del área en estudio [1].

Para la realización del presente estudio, se utilizaron colpas extraídas desde la superficie del basamento de roca, expuesta luego de un movimiento de tierra masivo realizado en el sector en estudio, y testigos obtenidos desde un sondaje ejecutado en el área de interés.

La inspección de la superficie expuesta de roca y el mapeo del sondaje indica que el basamento está constituido por rocas con meteorización muy variable, entre alta y baja, con GSI que varía entre 40 y 55, con promedio 50, valores promedio de RQD de aproximadamente 40% y un RMR en torno a 50.

3 Comportamiento Geomecánico

3.1 Efecto de Inmersión en Agua

Con el objetivo de observar el comportamiento de la roca en estudio al estar en contacto con agua, se llevaron a cabo ensayos de inmersión en agua de colpas de roca extraídas desde la superficie de roca expuesta. Cabe señalar que previo a la inmersión, las colpas fueron secadas al aire durante 24 hrs.

Los resultados del ensayo, en términos de secuencias fotográficas de las muestras a distintos tiempos de inmersión, se presentan en las Figs. 2 a 4. Se advierte que el proceso de saturación de las muestras M-SAT-1 y M-SAT-2 (Figs. 2 y 3, respectivamente) produce la disgregación y desintegración total de las muestras en un tiempo máximo de 2 min, generando un material correspondiente a suelo.

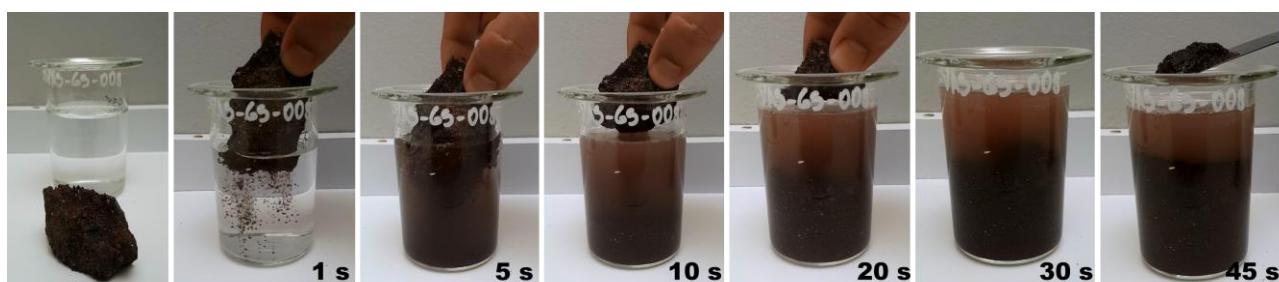


Fig. 2 – Ensayo de inmersión en agua de muestra M-SAT-1.

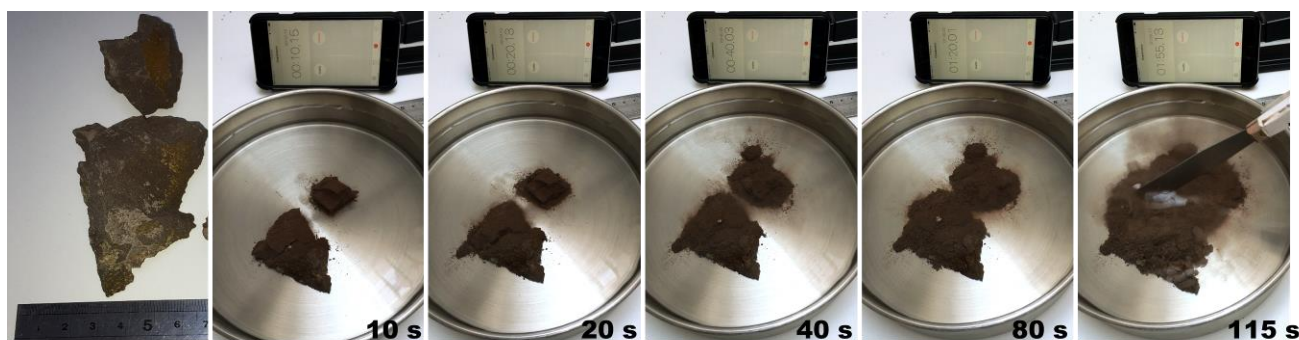


Fig. 3 – Ensayo de inmersión en agua de muestra M-SAT-2.

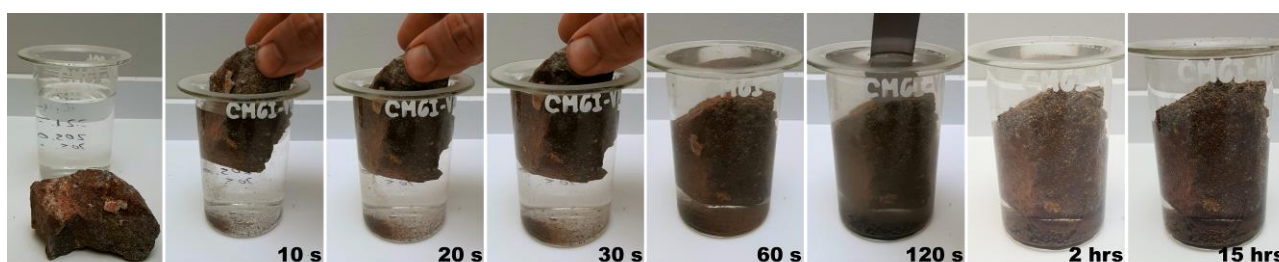


Fig. 4 – Ensayo de inmersión en agua de muestra M-SAT-3.

En el caso de la muestra M-SAT-3 (Fig. 4), la inmersión en agua no generó una pérdida de integridad de la roca, incluso luego de 15 horas sumergida. Durante el periodo que se mantuvo sumergida, la muestra presentó desprendimiento menor de material superficial, hecho que no afectó mayormente su condición de roca.

Adicionalmente, para verificar el comportamiento de la roca en profundidad, se llevaron a cabo pruebas de inmersión en agua en muestras de sondaje ejecutado en el sector en estudio, cuyos resultados cualitativos se resumen en la Tabla 1. Cabe señalar que estas muestras estaban totalmente secas previo a su inmersión en agua. En la Fig. 5 se incluyen fotografías de los testigos de la roca prospectada.

Tabla 1 – Ensayos de inmersión en muestras de sondaje.

Profundidad de la muestra (m)	Tiempo de inmersión en agua (min)	Condición final de la muestra
12.0	1	Desintegración total
14.6	7	Desintegración total
17.7	1.5	Desintegración total
18.6	5	Desintegración parcial
21.7	5	Desintegración total
23.9	5	Solo desintegración superficial
25.9	7	Desintegración total
28.9	10	Desintegración parcial

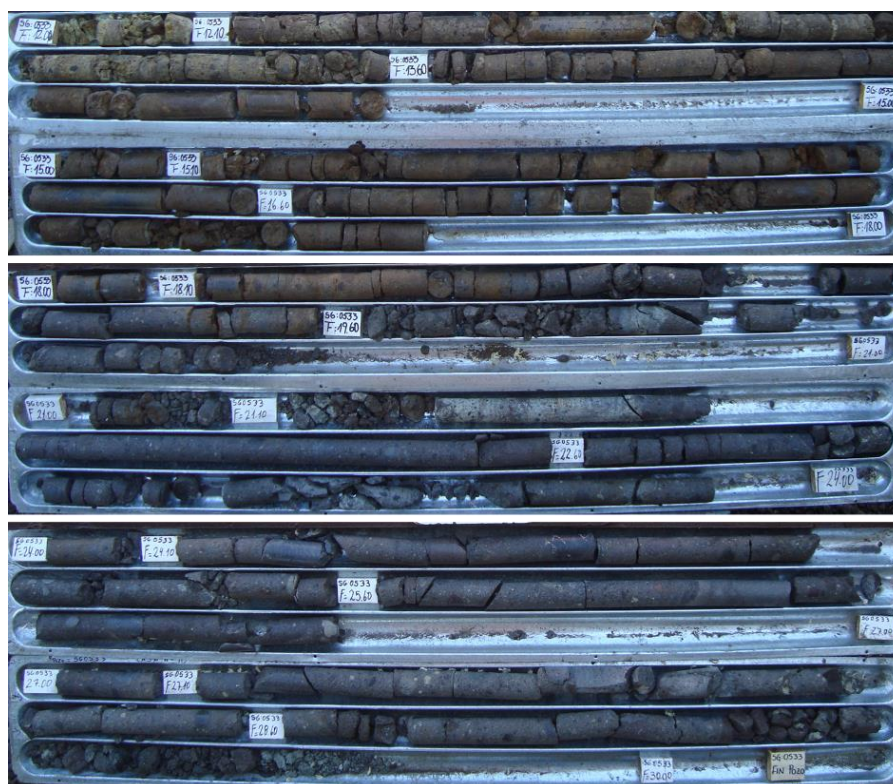


Fig. 5 – Testigos de roca utilizados en las pruebas de inmersión en agua.

El ensayo de inmersión realizado con muestras de sondaje indica, en general, que el basamento rocoso del sector en estudio en la totalidad de la profundidad prospectada es susceptible a sufrir su desintegración al estar sujeta a cambios de humedad. No obstante, existen tramos del sondaje con menor alteración, donde los testigos no pierden su condición de roca al ser sumergidos en agua, al igual que la muestra M-SAT-3.

Otro aspecto relevante es que el fenómeno de desintegración ocurre en un tiempo acotado, en general, dentro de un periodo de 5 min. Ensayos adicionales realizados con muestras obtenidas de otros sondajes disponibles indican que muestras que no se desintegran durante el tiempo mencionado, mantienen su condición de roca incluso posterior a 24 hrs de inmersión en agua.

3.2 Efecto del Agua en la Resistencia

En la Tabla 2 se presentan los resultados de ensayos de compresión no confinada realizados sobre testigos de roca obtenidos de sondajes realizados en el área de estudio. En los ensayos se utilizó muestras con humedad natural y testigos previamente sumergidos por 24 hrs en agua, con el propósito de evaluar el efecto del cambio de humedad de la roca en su resistencia. Cabe señalar que las muestras utilizadas en estos ensayos no perdieron su condición de roca al ser sumergidas en agua durante el periodo antedicho.

La resistencia obtenida en muestras con humedad natural es de 5 y 10 MPa, valores que se asocian a rocas blandas [7]. En lo que respecta a las muestras que fueron previamente sumergidas en agua, éstas fallaron en “precarga”, que corresponde a la etapa de ajuste inicial de los elementos del equipo de carga, previo al comienzo del ensayo de compresión. De acuerdo a las características del equipo, la sollicitación máxima a la que podrían haber estado sujetas las muestras durante la etapa de “precarga” es de 1 MPa. Estos resultados indican una importante reducción de la resistencia de la roca producto del cambio de humedad. En efecto, la resistencia exhibida por las muestras sumergidas en agua podría ser incluso menor al 10% de la resistencia de la misma muestra en estado de humedad natural. La reducción sería mayor en muestras que se desintegran al estar en contacto con agua.

Tabla 2 – Resultados ensayos de compresión no confinada.

Profundidad de la muestra (m)	Condición muestra	UCS ₅₀ (MPa)
21.2	Humedad natural	5.2
	Previa inmersión en agua	< 1 (*)
32.7	Humedad natural	10.2
	Previa inmersión en agua	< 1 (*)

(*) Falla en precarga.

Para la obtención de parámetros de resistencia al corte en condición saturada, de la roca que se disgrega al estar en contacto con agua, se llevaron a cabo ensayos triaxiales, utilizando equipos para ensayos de suelo. Los ensayos fueron ejecutados en condición no drenada, utilizando presiones de confinamiento de 0.5 y 4.0 kg/cm². En la Fig. 6 se presentan los resultados obtenidos, en términos de curvas tensión-deformación y de variación de la presión de poros.

Se advierte que el comportamiento exhibido se condice con la respuesta característica de suelos. En efecto, la muestra ensayada a un confinamiento de 0.5 kg/cm^2 presentó una tendencia dilatante, caracterizada por la generación de presiones de poros negativas, mientras que la probeta a 4 kg/cm^2 de confinamiento registra un comportamiento contractivo, con dilatancia a deformaciones superiores al 4%.

En el gráfico de la izquierda de la Fig. 7 se incluyen las trayectorias de tensiones efectivas registradas en los ensayos triaxiales no drenados, a partir de las cuales se define la envolvente de falla, obteniéndose parámetros de resistencia al corte de la roca en condición saturada representados por un ángulo de fricción interna de 32° y un valor de cohesión igual a 3.7 t/m^2 . Estos resultados confirman que la saturación de la roca en estudio genera un material que presenta características y comportamiento correspondiente a suelo.

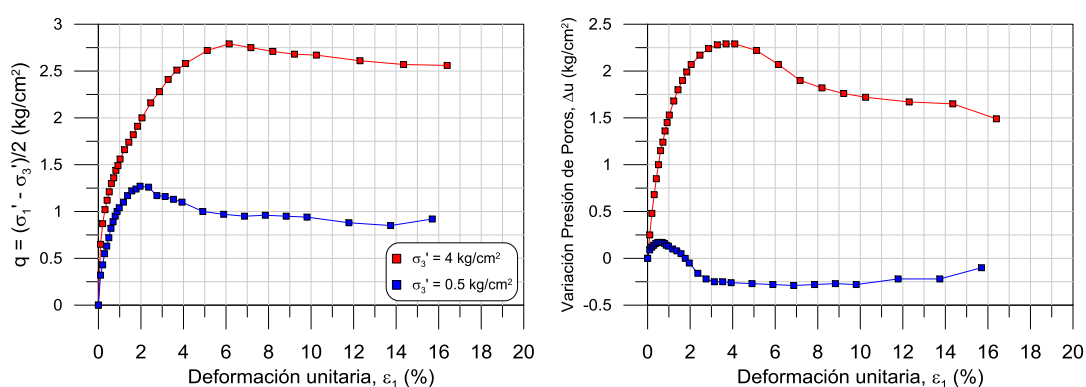


Fig. 6 – Ensayo triaxial en muestras de roca saturadas sujetas a disgregación.

Con el propósito de evidenciar la diferencia en el comportamiento y evaluar el cambio de la resistencia producto de la saturación de la roca en estudio, se ejecutó una serie de ensayos de compresión triaxial de roca utilizando muestras con humedad natural. Como resultado, se obtuvo la envolvente de falla, de tipo Mohr-Coulomb, que se presenta en la grafico de la derecha de la Fig. 7, la cual define un ángulo de fricción interna de 65° y 120 t/m^2 de cohesión. En el mismo gráfico se incluye la envolvente de falla obtenida de los ensayos con muestras saturadas, advirtiéndose la importante pérdida de resistencia por efecto del agua.

Otro aspecto relevante de mencionar es el efecto en la rigidez. Las muestras a humedad natural presentan valores de módulo de deformación en torno a $1 \times 10^4 \text{ MPa}$, que corresponden a valores típicos asociados a rocas blandas [8], mientras que los módulos de deformación obtenidos desde las curvas tensión-deformación de los ensayos triaxiales con muestras saturadas (gráfico izquierdo Fig. 6) presentan valores de alrededor de 15 MPa .

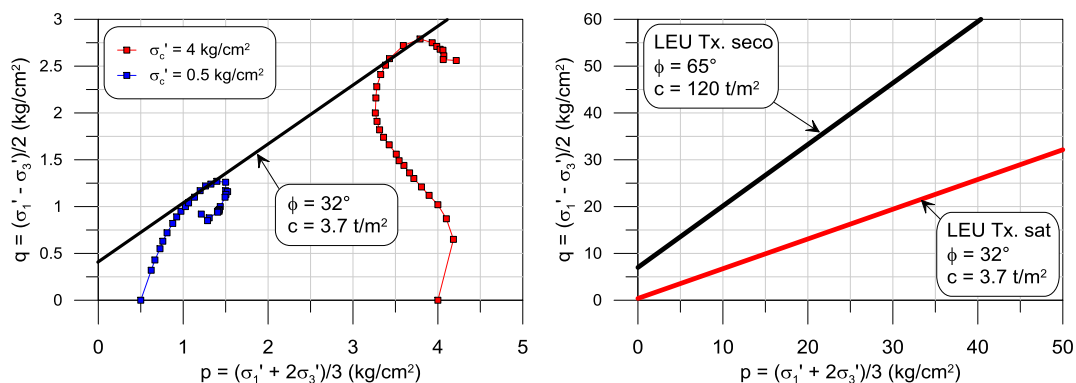


Fig. 7 – Resultado ensayo triaxial.

3.3 Efecto del Agua en el Hinchamiento

En la Fig. 8 se presenta el resultado del ensayo de hinchamiento, en condición donde se permite la libre deformación vertical, realizado con muestra de roca en estudio previamente secada al aire por 24 hrs. Se advierte un rápido desarrollo de deformaciones, las que se inician al mismo instante de la inmersión en agua. En los primeros 5 min de ensayo se registra alrededor del 70% de la deformación total exhibida por la muestra, hecho que se condice con el tiempo en el cual se produce la disgregación y desintegración de la roca al ser sumergida en agua.

El ensayo anterior permite establecer que la inmersión en agua de la muestra de roca resulta en un hinchamiento de un 0.8%, valor que es bajo en suelos, pero alto para una roca. Ahora bien, en el ensayo de presión de hinchamiento donde se restringe el cambio volumétrico, la misma muestra generó una presión de 28 t/m².

En la literatura técnica, el fenómeno de incremento de volumen o hinchamiento se asocia principalmente a procesos generados por la hidratación de minerales de arcilla contenidos en la matriz rocosa. Por ejemplo, en el estudio de Galera et al. [9] se identificó una correlación entre el contenido de montmorillonita y la presión de hinchamiento de muestras de roca.

En este contexto, se definió la ejecución de ensayos de Difracción de Rayos X con el propósito de identificar y cuantificar la posible presencia de minerales de arcilla en la roca en estudio. El resultado del ensayo, en términos de compuestos identificados y proporción presente en las muestras, se presenta en la Tabla 3.

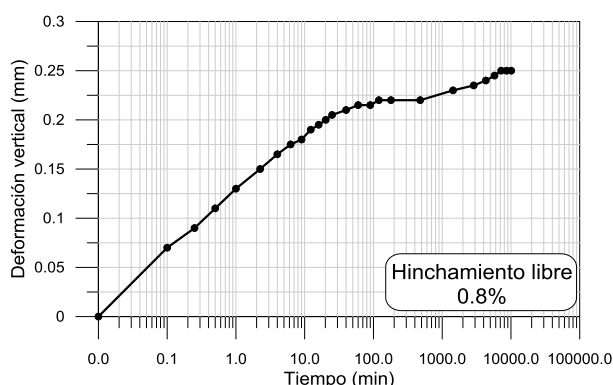


Fig. 8 – Ensayo de hinchamiento libre.

Tabla 3 – Cuantificación de fases cristalinas identificadas – ensayo difracción Rx.

Nombre del compuesto	Formula	Cuantificación M1 (%)	Cuantificación M2 (%)
Anortita	$(Ca,Na)(Si,Al)_4O_8$	15.4	9.6
Albita	$Na(Si_3Al)O_8$	12.6	7.4
Hematita	Fe_2O_3	1.9	1.1
Pseudomalaquita	$Cu_5(PO_4)_2(OH)_4$	1.5	< 0.5
Faujasita	$Na_2CaAl_4Si_{10}O_{28} \cdot 20H_2O$	1.8	2.8
Ortoclasa	$KAlSi_3O_8$	18.8	-
Calcita	$CaCO_3$	12.0	3.8
Sanidina	$K(Si_3Al)O_8$	-	5.9
Material Amorfo	-	45.9	69.0

Los compuestos identificados corresponden a Plagioclasas (anortita, albita), óxidos (hematita), fosfatos (pseudomalaquita), zeolita (faujasita), feldespato (Ortoclasa, Sanidina) y carbonatos (Calcita). Cabe destacar el importante porcentaje de material amorfo informado en ambas muestras. De acuerdo a la génesis del material rocoso presente en el sector en estudio, se estima que el material amorfo podría corresponder a vidrio volcánico.

Como se advierte, no se identificó la presencia de minerales de arcilla en las muestras ensayadas. Este hecho implica que el fenómeno de hinchamiento y desintegración observado en la roca en estudio estaría gatillado por otro proceso diferente al clásico asociado con el de doble capa en arcillas. A la fecha, los autores no han encontrado evidencia en la literatura técnica que indique reacciones o comportamientos especiales de los compuestos identificados al estar en contacto con agua.

4 Recomendaciones Prácticas

Los resultados del programa de ensayos indican una importante degradación de la competencia geomecánica de la roca en estudio producto del contacto con agua. Como se señala, el agente gatillante del fenómeno de degradación y desintegración de la roca es el cambio de humedad, por lo que obras que generen la exposición al ambiente del macizo rocoso, o que impliquen un aporte adicional de agua hacia el basamento de roca, deben ser especialmente analizadas.

El diseño geotécnico-geomecánico de dichas obras en rocas susceptibles a generar el fenómeno descrito requiere del reconocimiento del mismo y de la adecuada caracterización del macizo. Para estos efectos, se propone una metodología a aplicar en las etapas de identificación, caracterización y diseño.

El objetivo de la etapa de identificación es reconocer la ocurrencia del fenómeno. Para ello se recomienda efectuar pruebas de inmersión en agua utilizando muestras de la roca en análisis. Para representar la pérdida de humedad de macizos que son expuestos al ambiente, las muestras de roca deben ser secadas al aire por un tiempo no menor a 24 hrs. Asimismo, la inmersión en agua debe ser de al menos 24 hrs. Si las muestras de roca utilizadas en la prueba no sufren la desintegración y/o disgregación, se recomienda llevar a cabo ensayos de compresión no

confinada, utilizando testigos con humedad natural y testigos previamente sumergidos por 24 hrs en agua, con el propósito de evaluar la eventual degradación de la resistencia.

En el caso de identificar la desintegración de la roca y/o una pérdida importante de la resistencia producto de la inmersión en agua, se requiere de una caracterización geotécnica ad-hoc que permita obtener los parámetros en la condición de roca degradada. Para ello se propone la ejecución de ensayos de compresión triaxial en condición saturada utilizando equipos de suelos. Se recomienda que los parámetros de resistencia de la roca en condición degradada sean obtenidos considerando un criterio de falla del tipo Mohr-Coulomb.

En la etapa de diseño, se debe establecer los sectores donde el macizo rocoso puede estar sujeto a sufrir cambios de humedad, como por ejemplo a lo largo de la superficie expuesta en un corte en roca. En dichos sectores se propone considerar que una parte del basamento rocoso estará sujeto al fenómeno de degradación, asignándole las propiedades obtenidas en la etapa de caracterización. El sector y espesor de roca degradada a considerar depende de varios factores, siendo los más importantes el grado de fracturamiento del macizo y la cantidad estimada de agua a la que eventualmente estará expuesto.

En este sentido, la implementación de obras de saneamiento complementarias, permite minimizar los aportes de agua hacia el macizo rocoso.

Por otra parte, el comportamiento de la roca analizada en este estudio difiere de lo reportado en la literatura técnica, en cuanto que el fenómeno de hinchamiento está asociado a la presencia de minerales de arcilla en la matriz rocosa. Por este motivo, se recomienda investigar el mecanismo que gatilla el fenómeno observado.

5 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos de la ejecución del programa de ensayos experimentales considerados en este trabajo, es posible concluir que la roca en estudio presenta una importante degradación de sus propiedades al estar sujeta a cambios de humedad. Incluso algunas muestras registraron la completa disgregación y desintegración de su estructura al estar en contacto con agua, generando un material de características y comportamiento similar a suelo.

Este fenómeno estaría gatillado por la tendencia de hinchamiento exhibida por la roca, que genera la destrucción de su estructura inicial, con la consecuente pérdida de cohesión del material, lo que se traduce en una importante disminución de su resistencia y rigidez.

A diferencia de lo reportado en la literatura técnica, la tendencia de hinchamiento de la roca estudiada no se debe a la presencia de minerales de arcilla en la matriz rocosa. En este sentido, se recomienda la ejecución de estudios que permitan establecer el mecanismo que genera el hinchamiento.

Es importante mencionar que la Formación Farellones, a la cual pertenece la roca en estudio, se extiende en una gran franja longitudinal en los Andes Centrales, desde la IV hasta la VI Región. Esto implica que el fenómeno de degradación de la roca observado en el presente estudio podría replicarse en otros sectores del país.

La correcta caracterización y reconocimiento de este fenómeno es de gran importancia en la práctica de la ingeniería geotécnica. Para ello se propone una metodología que permite su

identificación, dando confiabilidad al diseño de obras en rocas de similares características a las del presente estudio. Adicionalmente se indican recomendaciones para la caracterización de rocas susceptibles a la disgregación y para el diseño de obras emplazadas en dichas rocas.

6 Agradecimientos

El presente trabajo es parte de los estudios geotécnicos-geomecánicos llevados a cabo por CMGI Ltda. para el desarrollo de obras de infraestructura minera, por lo que se agradece a la Vicepresidencia de Proyectos de CODELCO por permitir la publicación de este artículo.

Referencias

- [1] Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Norell, M., Zapatta, F., McKenna, F. and Novacek, M. New Evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the Upper Tinguiririca Valley (35°S), Central Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 1996; 9: 393 – 422.
- [2] Klohn, C. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín 8. Santiago, Chile. 1960.
- [3] Gómez, R. Geología de la Unidades Volcanogénicas Cenozoicas del Área Industrial de la Mina El Teniente, entre Colón y Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región. Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile. 2001.
- [4] Charrier, R. Geología de las Provincias de O'Higgins y Colchagua. Instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN), Publicación 7. Santiago, Chile. 1973
- [5] Vergara, M., Charrier, R., Munizaga, F., Rivano, S., Sepúlveda, P., Thiele, R. and Drake, R. Miocene Volcanism in Central Chilean Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 1988; 1: 199 – 209.
- [6] Skewes, M., Arévalo, A., Floody, R., Zúñiga, P and Stern, C. The Giant El Teniente Breccia Deposit: Hypogene Copper Distribution and Emplacement. In: Goldfarb R, Nielsen R, editors. Integrated Methods for Discovery: Global Exploration in the 21st Century, Society of Economic Geologist Special Publication 9; 2002, p. 299 – 332.
- [7] ISRM. Rock characterization. Testing and monitoring. ISRM suggested methods. Brown, E. T. Ed. Commission on testing and monitoring. International Society for Rock Mechanics. Pergamon Press.; 1981.
- [8] González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. Ingeniería Geológica. Pearson Educación. Madrid, España. 2002.
- [9] Galera, J. M., Paredes, M., Mencheroand, C. and Pozo, V. Risk associated with swelling rocks in volcanic formations in the design of hydro-tunnels". *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses*, CRC Press; 2014, p. 841 – 846.