

INFLUENCIA DE LA ALTERACIÓN HIDROTHERMAL EN LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO

José Daniel Ale Véliz⁽¹⁾⁽³⁾, Carlos Huamán Egoávil⁽²⁾, Pedro Tumialán de la Cruz⁽¹⁾⁽²⁾

(1) Escuela Académica Profesional Ingeniería Geológica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos; (2) Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería; (3) Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba

jose.ale@gmail.com

RESUMEN

Este artículo revisa y discute los procesos de alteración hidrotermal que tienen mayor influencia en los yacimientos minerales en el Perú, y su impacto sobre la resistencia de la roca intacta y el macizo rocoso, así como el efecto sobre la estabilidad de taludes de tajos abiertos, y la disminución de la capacidad de carga en los terrenos de fundación afectados por estos procesos. En este trabajo se evalúa la influencia de la alteración hidrotermal sobre los parámetros usualmente empleados en los sistemas de clasificación geomecánica, especialmente la dureza de la roca, medida principalmente a través de ensayos de carga puntual y compresión no confinada. Las correlaciones propuestas sirven para la aplicación en un caso de análisis de estabilidad de taludes de un tajo abierto en una zona con fuerte alteración hidrotermal.

INTRODUCCION

El objetivo del presente artículo es encontrar una relación de la influencia de la alteración hidrotermal en la calidad del macizo rocoso en un yacimiento desde el punto de vista geomecánico a partir de la resistencia compresiva de la roca intacta, y el impacto de esta alteración en la estabilidad de taludes. Por su génesis, estos yacimientos han sido originados por procesos de mineralización, los cuales han modificado (en la mayoría de los casos desfavorablemente) las propiedades físicas y mecánicas de la roca caja que alberga los yacimientos, y sobre la cual se tendrán que diseñar los taludes del tajo u otras estructuras de importancia.

PROCESOS DE ALTERACION EN UN MACIZO ROCOSO

ALTERACION EN ROCA

El término alteración implica modificaciones complejas de la roca pre-existente o primaria. Estas modificaciones abarcan cambios mineralógicos, texturales y de composición. El buen entendimiento de estas relaciones complejas, depende de un enfoque descriptivo sistemático multidisciplinario que incluye aspectos de vulcanología, geología de yacimientos, petrología, geoquímica, y mecánica de rocas. Desafortunadamente relativamente pocos estudios han integrado adecuadamente estos conjuntos de datos (Gifkins et al., 2005). La integración de las observaciones de las propiedades físicas y de los datos geoquímicos es una poderosa herramienta en el estudio de las rocas alteradas. Las características físicas y las concentraciones de la parte inmóvil o no alterada de las rocas alteradas pueden ayudar a identificar la roca original, donde los minerales y las texturas primarios son concluyentes (Paulick y McPhie, 1999; Barrett et al., 2001). Los cambios físicos y químicos que produjeron la alteración pueden ayudar a determinar el grado de alteración (es decir, la intensidad de alteración), el estilo de alteración (es decir, isoquímica versus metasomática) y a discriminar entre los procesos de alteración, como diagénesis, metamorfismo y alteración hidrotermal (Offler y Whitford, 1992; Gifkins y Allen, 2001). Además, este enfoque integrado puede conducir al desarrollo de guías de exploración hacia yacimientos minerales (Large et al., 2001).

ALTERACION HIDROTHERMAL

Hace referencia al efecto de las aguas o fluidos de altas temperaturas sobre las rocas, las cuales se elevan desde la profundidad hacia la superficie. Estos fluidos hidrotermales son en su mayoría de origen magmático (Giggenbach, 1997). Implica una interacción química entre los elementos de la roca primaria y los elementos (iones disueltos en gran cantidad) llevados en solución a través del flujo hidrotermal (Fitcher, 2000; Zharikov et al., 2007). Si producto de esta interacción entre la roca primaria y el fluido hidrotermal hay sustracción o adición de compuestos químicos, se denomina

metasomatismo (Zharikov et al., 2007). La alteración hidrotermal comúnmente está localizada dentro de un radio de unos pocos metros de las fallas o fracturas principales, y puede ocurrir a lo largo de zonas de un kilómetro de ancho o más (Whaltam, 2002). En la naturaleza se reconocen variados tipos de alteración hidrotermal, caracterizados por asociaciones de minerales específicos. Los distintos tipos de alteración e intensidad son dependientes de factores tales como composición del fluido hidrotermal, la composición de la roca encajonante, la temperatura, la acidez (pH), la energía, la relación agua/roca y el tiempo de interacción, entre otros (Townley, 2005). El principal producto de los procesos de alteración hidrotermal son por lo general nuevos minerales hidratados y débiles, por lo que, normalmente la roca alterada hidrotermalmente es significativamente más débil que la roca primaria.

TIPOS DE ALTERACION HIDROTERMAL

Existen tantos tipos de alteración hidrotermal como tipos de yacimientos de minerales existen (Faulkner, 1992). Los siguientes son los más comunes: Propilítica, Sericítica, Potásica, Albítica, Silicificación, Silicación, Carbonatización, Alunítica, Argílica, Zeolítica, Serpentinización, Oxidación.

CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Se mencionan a continuación los principales métodos de clasificación desarrollados durante la historia de la mecánica de rocas, muchos de estos han sido desarrollados netamente para el diseño de túneles, pero igualmente se mencionarán sin entrar a detalles:

- Clasificación de Cargas Litostáticas – Terzaghi (1946).
- Clasificación del Tiempo de Estabilidad – Stini y Lauffer (1958).
- Índice de la Determinación de la Calidad de Roca (RQD) – Deere (1967).
- Clasificación de la Estructura de la Roca (RSR) – Wickham (1972).
- Clasificación del Macizo Rocosó (RMR) – Bieniawski (1973, 1989).
- Índice de Calidad de la Roca en Túneles (Q) – Barton (1974).
- Índice de Resistencia Geológica (GSI) – Hoek y Brown (1980).
- Índice de Macizo Rocosó (RMi) – Palmström (1995).

En el diseño de taludes, en la actualidad solamente 3 de estos métodos de clasificación mencionados son los que tiene un uso aplicativo, el RQD, el RMR y el GSI.

RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA EN FUNCION DE LA ALTERACIÓN HIDROTERMAL

Se ha realizado una revisión de numerosa información de investigación geotécnica (perforaciones diamantinas) realizada en macizos rocosos en yacimientos hidrotermales; estas investigaciones han formado parte de proyectos de diseño de taludes de tajos abiertos, pads de lixiviación, botaderos de desmonte, entre otros. Los registros geotécnicos de campo realizados, incluyeron la determinación de la litología, medición de la recuperación del testigo, medición del RQD, medición del grado de fracturamiento de la roca, determinación de la condición de discontinuidades, determinación del grado de alteración de la roca acorde con la ISRM (1981), estimación en campo de la dureza de la roca y la toma de muestras; en las muestras llevadas a un laboratorio, se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial (ASTM D2938), e índice de carga puntual (ASTM D5731). Se ha recopilado más de 600 resultados de laboratorio con sus respectivos registros geotécnicos de campo; estos ensayos han sido agrupados con respecto a su litología, y a su vez en función de su grado alteración. A partir de este agrupamiento se ha realizado una caracterización de la roca en función a su grado de alteración.

Los registros del grado de alteración de la roca en todas las muestras ensayadas, han seguido la metodología propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) con una ligera modificación como se muestra en la Tabla 1. La relación entre los valores de resistencia a la carga puntual (Is50) y la compresión uniaxial no confinada (UCS) se realizado mediante la metodología propuesta por Palmström (1995).

Tabla 1 – Determinación del Grado de Alteración de la Roca (ISRM, 1981)

| GRADO DE ALTERACIÓN (ISRM) | TERMINO | DESCRIPCIÓN | GRADO DE ALTERACIÓN | VALOR NUMÉRICO ASIGNADO |
|----------------------------|---------|-------------|---------------------|-------------------------|
|----------------------------|---------|-------------|---------------------|-------------------------|

| | | | | | |
|-----|------------------------|---|---|----|----|
| I | Fresco | No aparece signos visibles de alteración, tal vez ligera decoloración en las grandes superficies de discontinuidad. | F | F | 15 |
| | | | | F- | 14 |
| II | Ligeramente alterado | Todo el macizo rocoso está decolorado por la alteración. La decoloración indica alteración del macizo rocoso y de las superficies de discontinuidad. | E | E+ | 13 |
| | | | | E | 12 |
| | | | | E- | 11 |
| III | Moderadamente alterado | Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece de forma continua o como núcleos aislados. | D | D+ | 10 |
| | | | | D | 9 |
| | | | | D- | 8 |
| IV | Altamente alterado | Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece de forma discontinua o como núcleos aislados. | C | C+ | 7 |
| | | | | C | 6 |
| | | | | C- | 5 |
| V | Completamente alterado | Todo el macizo rocoso se ha descompuesto o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso. | B | B+ | 4 |
| | | | | B | 3 |
| | | | | B- | 2 |
| VI | Suelo residual | Todo el material rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo rocoso. | A | A+ | 1 |
| | | | | A | 0 |

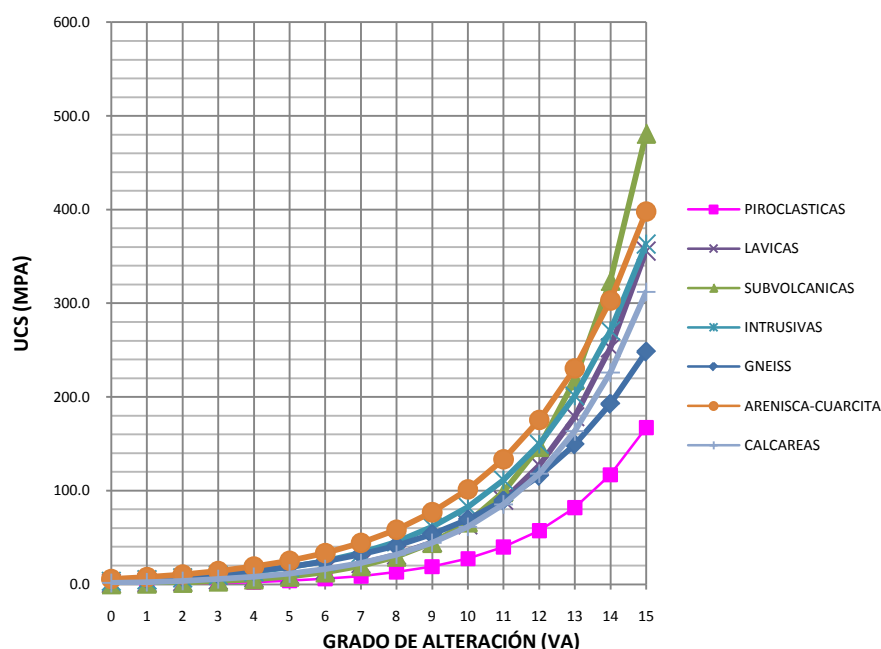


Figura 1 – Relación empírica entre el la resistencia a la compresión uniaxial no confinada (UCS) y el grado de alteración (VA) en casos de alteración hidrotermal para distintas litologías.

Se ha realizado una regresión estadística del tipo lineal, parabólica, exponencial, y potencial, para de esta manera poder correlacionar la resistencia a la compresión uniaxial no confinada del la roca intacta con el grado de alteración, siguiendo las recomendaciones mostradas en la Tabla 1. A Continuación mostramos la Figura 1 muestra la correlación del tipo exponencial para cada tipo de litología analizado.

CASO DE APLICACIÓN

Una vez determinada una relación entre el grado de alteración hidrotermal de los tipos de roca analizados y la resistencia a la compresión uniaxial no confinada en la roca, se procede a realizar la clasificación de un macizo rocoso alterado por efecto hidrotermal. Como caso de aplicación se toma el diseño de taludes en una zona de mineralización del tipo hidrotermal; se clasificará la roca mediante la clasificación GSI para posteriormente obtener las envolventes de resistencia al corte según el criterio de falla de Hoek-Brown, extendido al caso de macizos rocosos fracturados. Para este caso en particular, la variación de la resistencia a la compresión uniaxial no confinada (UCS) corresponderá al de rocas piroclásticas, compuestas por tobas y areniscas tobáceas. La envolvente no lineal de Hoek-Brown para este tipo de rocas ha sido calculada según los datos de la Tabla 2.

Tabla 2 – Variación del GSI en Función del Grado de Alteración y los Parámetros del Criterio de Falla de Hoek-Brown – Rocas Piroclásticas

| VA | UCS (MPa) | GSI | m_i | m_b | s | a |
|----|-----------|-----|-------|-------|--------|-------|
| 0 | 0.00 | 17 | 8.00 | 0.413 | 0.0001 | 0.553 |
| 1 | 0.35 | 20 | 8.67 | 0.499 | 0.0001 | 0.544 |
| 2 | 0.86 | 23 | 9.33 | 0.600 | 0.0002 | 0.535 |
| 3 | 1.58 | 26 | 10.00 | 0.717 | 0.0003 | 0.529 |
| 4 | 2.60 | 29 | 10.67 | 0.853 | 0.0004 | 0.523 |
| 5 | 4.05 | 32 | 11.33 | 1.011 | 0.0005 | 0.519 |
| 6 | 6.13 | 35 | 12.00 | 1.195 | 0.0008 | 0.516 |
| 7 | 9.09 | 38 | 12.67 | 1.407 | 0.0011 | 0.513 |
| 8 | 13.30 | 42 | 13.33 | 1.652 | 0.0015 | 0.510 |
| 9 | 19.30 | 45 | 14.00 | 1.936 | 0.0021 | 0.508 |
| 10 | 27.85 | 48 | 14.67 | 2.263 | 0.0030 | 0.507 |
| 11 | 40.03 | 51 | 15.33 | 2.639 | 0.0042 | 0.505 |
| 12 | 57.38 | 54 | 16.00 | 3.073 | 0.0059 | 0.504 |
| 13 | 82.11 | 57 | 16.67 | 3.571 | 0.0083 | 0.504 |
| 14 | 117.33 | 60 | 17.33 | 4.144 | 0.0117 | 0.503 |
| 15 | 167.52 | 63 | 18.00 | 4.802 | 0.0164 | 0.502 |

NOTA:

Las rocas piroclásticas están conformadas por tobas y areniscas tobáceas.

Finalmente, se realizaron análisis de estabilidad de taludes mediante el método de equilibrio límite, usando el método de Spencer. La Tabla 3 muestra los resultados de estos análisis.

Tabla 3 – Factor de Seguridad en Función del Ángulo del Talud y el Grado de Alteración

| VA | FACTOR DE SEGURIDAD | | | |
|----|---------------------|--------|--------|--------|
| | 15° | 20° | 25° | 30° |
| 1 | 1.258 | 0.984 | 0.819 | 0.733 |
| 2 | 1.947 | 1.519 | 1.254 | 1.119 |
| 3 | 2.629 | 2.043 | 1.691 | 1.499 |
| 4 | 3.359 | 2.604 | 2.153 | 1.904 |
| 5 | 4.151 | 3.217 | 2.650 | 2.338 |
| 6 | 5.036 | 3.898 | 3.207 | 2.827 |
| 7 | 6.032 | 4.666 | 3.838 | 3.386 |
| 8 | 7.181 | 5.555 | 4.580 | 4.045 |
| 9 | 8.536 | 6.618 | 5.469 | 4.849 |
| 10 | 10.207 | 7.948 | 6.585 | 5.887 |
| 11 | 12.396 | 9.689 | 8.055 | 7.282 |
| 12 | 15.322 | 12.065 | 10.101 | 9.197 |
| 13 | 19.492 | 15.450 | 13.014 | 11.984 |
| 14 | 25.789 | 20.583 | 17.550 | 16.265 |
| 15 | 35.701 | 28.504 | 24.580 | 22.949 |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) American Society for Testing and Materials; “D2938-95 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens”.
- 2) American Society for Testing and Materials; “D5731-95 Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications”.
- 3) Barrett, T.J., MacLean, W.H. y Tennant, S.C. (2001); “Volcanic Sequence and Alteration at the Parys Mountain Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposit, Wales, United Kingdom: Applications of Immobile Element Litho geochemistry”; Economic Geology, Volume 96, pp. 1279-1305.
- 4) Barton, N.R., (1974); “A Review of the Shear Strength of Filled Discontinuities in Rock”; Proceedings of Rock Mechanics Meeting; Oslo, Norway.
- 5) Bieniawski, Z.T. (1975); “The Point Load Test in Geotechnical Practice”; Engineering Geology, Volume 9, Issue 1, pp. 1-11.
- 6) Bieniawski, Z.T. (1976); “Rock Mass Classification in Rock Engineering”, In “Exploration for Rock Engineering”; Proceedings of the Symposium of Rock Mechanics, pp. 97-106.
- 7) Bieniawski, Z.T. (1989). “Engineering Rock Mass Classification”; Wiley; New York, USA.
- 8) Deer, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D. y Cording, E.J. (1967); “Design of Surface and Near Surface Construction in Rock”, In “Failure and Breakage of Rock”; Proceedings of 8th US Symposium of Rock Mechanics, pp. 237-302.
- 9) Deere, D.U. y Deere, D.W. (1988); “The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice”, In “Rock Classification Systems for Engineering Purposes”; American Society for Testing and Materials Special Publication, Volume 984, pp. 91-101.

- 10) Faulkner, E.L. (1992); *"Introduction to Prospecting"*; Geological Survey Branch, Mineral Resources Division, Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources; British Columbia, Canada.
- 11) Gifkins, C.C. y Allen, R.L. (2001); *"Textural and Chemical Characteristics of Diagenetic and Hydrothermal Alteration in Glassy Volcanic Rocks: Examples from the Mount Read Volcanics, Tasmania"*; *Economy Geology*, Volume 96, pp. 973-1002.
- 12) Gifkins, C., Herrmann, W., y Large, R. (2005); *"Altered Volcanic Rocks – A Guide to Description and Interpretation"*; Centre Ore Deposit Research, University of Tasmania, Hobart.
- 13) Giggenbach, W.F. (1997), *"The Origin and Evolution of Fluids in Magmatic-Hydrothermal Systems,"* *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 3rd edition, H.L. Barnes editors, John Wiley and Sons, New York, USA.
- 14) Hoek, E. y Brown, E.T. (1980); *"Empirical Strength Criterion for Rock Masses"*; *Journal of Geotechnical Engineering Division*; ASCE 106: GT9; pp 1013-1035.
- 15) Hoek, E. y Brown, E.T. (1997); *"Practical Estimates of Rock Mass Strength"*; *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*; 34 (8), pp. 1165–1186.
- 16) International Society of Rock Mechanics (1981); *"Suggested Methods for Determining the UCS and Deformability of Rock Materials"*.
- 17) International Society of Rock Mechanics (1985); *"Suggested Method for Determining Point Load Strength"*.
- 18) Large, R.R., Allen, R.L., Blake, M.D. y Herrmann, W. (2001); *"Hydrothermal Alteration and Volatile Element Halos for the Rosebery K-Lens Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposit, Western Tasmania"*; *Economy Geology*, Volume 96, pp. 1055-1072.
- 19) Lauffer, H. (1958); *"Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau"*; *Geologie en Bauwesen*, Volume 24, N° 1, pp. 46–51.
- 20) Offler, R. y Whitford, D.J. (1992); *"Wall-Rock Alteration and Metamorphism of a Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposit at Que River, Tasmania: Petrology and Mineralogy"*; *Economic Geology*, Volume 87, pp. 686-705.
- 21) Palmström A. (1996); *"Characterizing Rock Masses by the R_{Mi} for Use in Practical Rock Engineering"*; Part 1: Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 11, N° 2, pp. 175-186. Part 2: Volume 11, N° 3, pp. 287-303.
- 22) Palmström A. (2000); *"Recent Developments in Rock Support Estimates by the R_{Mi}"*; *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, Volume 6, N° 1, pp. 1-19.
- 23) Palmström, A. (1995); *"R_{Mi}-A Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purposes"*; PhD Thesis, Department of Geology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo; Oslo, Norway.
- 24) Palmström, A. (1982); *"The Volumetric Joint Count - A Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Jointing"*; *Proceedings of 4th Congress of International Association of Engineering Geology*; Delhi, India; pp. 221-228.
- 25) Paulick, H., y McPhie, J. (1999); *"Facies Architecture of the Felsic Lava-Dominated Host Sequence to the Thalanga Massive Sulfide Deposit, Lower Ordovician, Northern Queensland"*; *Australian Journal of Earth Sciences*, Volume 46, pp. 391-405.
- 26) Stini, J. (1950); *"Tunnelbaugeologie"*; Springer Verlag; Vienna, Austria.
- 27) Terzaghi, K., Proctor, R.V. y White, T.L. (1946); *"Rock Tunneling with Steel Supports"*; Commercial Shearing and Stamping Co.
- 28) Townley, B.K. (2005); *"Yacimientos Minerales y Procesos Geológicos"*; Departamento de Geología – Universidad de Chile; Santiago, Chile.
- 29) Waltham, T. (2002); *"Foundations of Engineering Geology"*; Second Edition; Taylor and Francis Group; London, UK.
- 30) Wickham, G.E. (1972); *"Support Determination Based on Geologic Predictions"*; *Proceedings of Rapid Excavations & Tunneling Conference*, pp. 43-64.
- 31) Zharikov, V.A., Pertsev, N.N., Rusinov, V.L., Callegari, E. y Fettes, D.J. (2007); *"Metasomatism and Metasomatic Rocks"*; Fettes, D. & Desmons, J. editors: *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. New York, Cambridge University Press, pp. 58–69