

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DEL TRAVERTINO

Luza Huilca, Carlos A., Vargas Junior, Eurípides do Amaral

Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

RESUMEN

El travertino es una roca ampliamente utilizada en el mundo como una roca ornamental, pero sus propiedades petrológicas y mecánicas aparentemente análogas a los carbonatos de los yacimientos de petróleo como los hallados en el pre-sal en Brasil, influenció en la selección de esta roca con finalidad de entender el comportamiento geomecánico de las formaciones de dichos reservorios, y además actualmente estas formaciones contienen los mayores reservorios de hidrocarburo a nivel mundial, tanto en petróleo como gas. En este sentido el presente artículo tiene como objetivo analizar el comportamiento geomecánico del travertino Romano a través de un programa experimental con fin de obtener parámetros de interés para este tipo de rocas, poco conocidos en la literatura. Así este programa incluye una caracterización petrológica y mecánica de la roca, en el cual fue determinada su estructura, textura sedimentaria, composición química y mineralógica. Analizándose también su compleja estructura porosa caracterizada por macro y micro poros caóticamente distribuidos en la roca, los cuales presentaron una baja conectividad, siendo establecida una relación entre la porosidad y resistencia. También se analizaron los resultados de las pruebas de resistencia mecánica, tanto para el estado de uniaxial a triaxial de tensiones, mostrando una disminución en su resistencia mecánica con el incremento de la porosidad, y presentando un comportamiento frágil en la mayoría de los casos. Finalmente algunos de estos resultados fueron comparados con los resultados obtenidos en otras pesquisas.

Palabras Clave: Travertino, Caracterización geomecánica, Resistencia, Porosidad.

INTRODUCCIÓN

Los carbonatos en los últimos años han ganado importancia en la industria, la ciencia y la tecnología, esto motivada por el hecho de que aproximadamente el 60% de las reservas de hidrocarburos y el 40% de las reservas de gas mundiales se encuentran en rocas carbonáticas (Schlumberger, 2009) como se puede apreciar en la Figura 1. Las reservas del Pre-sal en Brasil son un ejemplo de este tipo de depósitos. El estudio de los carbonatos actualmente representa un gran desafío por su fuerte heterogeneidad y anisotropía. Esto debido a que presentan un sistema muy complejo de poros poco comprendido hasta ahora, y aun afectados por procesos naturales tales como diagénesis, reprecipitación, fracturación y dolomitización que originan sistemas de poros de diferente tamaño y forma, que puede variar desde unos pocos micrómetros a varios metros.

Además teniendo en cuenta que no siempre es factible obtener testimonios de perforación para la realización de estudios e investigaciones de los yacimientos de petróleo. Es que se hace uso de una técnica alternativa con intención de validar el comportamiento geomecánico de estas formaciones carbonáticas, el cual consiste en efectuar esta validación en rocas análogas a estos, siendo generalmente el travertino la roca usada para validar dichas formaciones del reservorio como fue en el caso del pre-sal en Brasil (Domingues, 2011).

En este sentido conocer el comportamiento geomecánico del travertino por medio de una correcta caracterización, que envuelva esquemas de clasificación prácticos es importante con el fin de proporcionar parámetros petrológicos fiables de la roca, además útil tanto para la industria petrolera y construcción, ya que el travertino se viene usando en muchas partes del mundo, desde los tiempos del Imperio Romano.

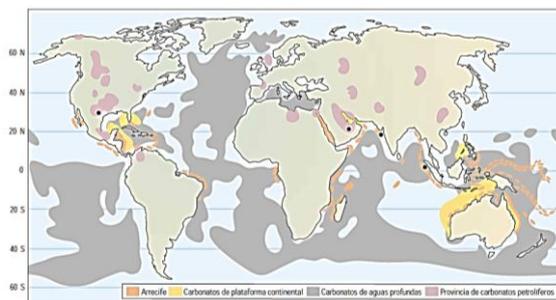


Figura 1. Distribución mundial de las reservas en carbonatos (Ahr et al., 2005).

MATERIAL Y MÉTODOS

Material: La roca usada en este estudio es el travertino Romano, conocido como *Lapis Tiburtinus*, y es encontrado en Italia cerca de la ciudad de Tivoli a 30 km al este de Roma, en la región de Lácio (Figura 2), en el cinturón Apenino central (Faccenna et al., 2008), este depósito data de aproximadamente 0.22 Ma correspondiente al pleistoceno medio – superior (Minissale et al., 2002) y constituye uno de los mayores depósitos conocidos de travertino del mundo de edad cuaternaria (Filippis et al., 2013). El travertino en esta región se encuentra horizontalmente estratificado en estratos lateralmente continuos a lo largo de una amplia extensión de aproximadamente 30 km² (Chafetz y Folk, 1984) con una potencia de 85 m.

Metodología: Los procedimientos metodológicos adoptados en este estudio fueron: preparación y selección del material, caracterización de la roca (análisis petrológico, mineralógico y químico, tomografías de rayos-X determinación de índices físicos y ensayos de resistencia mecánica uniaxial y triaxial) y presentación de resultados.

Caracterización petrológica, química y mineralógica: Fueron rectificadas (14) catorce cilindros de rocha con diámetros de dos pulgadas y longitud de cuatro pulgadas ($H/D \approx 2$) y 8 (ocho) laminas delgadas obtenidas de diferentes direcciones del bloque de travertino.

Los índices físicos fueron determinados en los (14) catorce cilindros de roca usando el método sugerido por la ISRM (Franklin et al., 2007). Luego (4) cuatro laminas delgadas fueron impregnadas con un colorante azul y examinadas en un microscopio de luz transmitida de modelo Axioskop Zeiss. Las demás fueron metalizadas en oro para su análisis en el microscopio electrónico de barrido (SEM) Jeol JSM – 6610 de la Thermo Scientific. El análisis mineralógico fue realizado mediante difracción de rayos-X usándose el difractómetro D8 Discover de la marca Bruker. El análisis químico fue realizado por fluorescencia de rayos-X de energía dispersa y análisis de química elemental empleándose el espectrómetro 800 HS de la marca Shimadzu y el analizador elemental EA 1112 respectivamente.

Caracterización de la estructura porosa: La estructura porosa de los (14) catorce cilindros de roca fueron escaneados en el micro-tomógrafo industrial V Tome x L300 de la marca GE/Phoenix, siendo escaneadas en el laboratorio de tomografía computarizada de Rayos-X de la PETROBRAS /CENPES, generándose imágenes de 880 x 880 x 1700 píxeles con una resolución de 60 μm , posteriormente estas fueron procesadas con el programa Phoenix datos|x 2.0 rec, y las imágenes 3D fueron visualizados en el programa Avizo Fire 8.0, siendo usado el filtro Non-Local Means, a fin de mejorar la visualización de la fase roca y la fase poro así mismo como disminuir el ruido existente en las imágenes. En este procedimiento se examinó principalmente la distribución, conectividad y geometría de los poros. Además se utilizó el programa Image J como parte del procedimiento para obtener la porosidad de cada una de los cuerpos de prueba (CP).

Caracterización mecánica: Para la caracterización mecánica fueron realizados ensayos de compresión uniaxial y triaxial basados en la norma ASTM 7012-13. Estos ensayos fueron efectuados en una célula triaxial de alta rigidez, diseñada y fabricada para el presente estudio, siendo aplicado un desplazamiento controlado con tasas entre 0,0008 - 0,0009 mm/min.

Los cuerpos de prueba (CP) fueron instrumentados con sensores de desplazamiento axial y radial siendo los resultados registrados por un sistema de control y monitoreo (CPU) auxiliados por el programa Triaxial rocha v1. Los módulos elásticos fueron calculados por

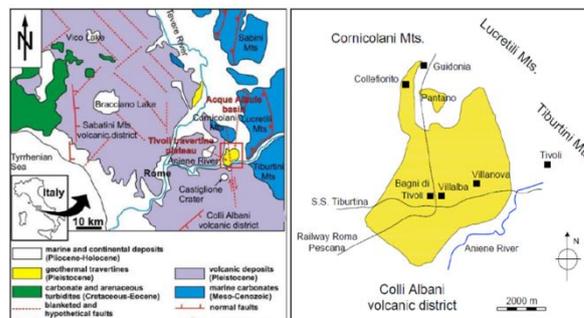


Figura 2. Mapa geológico de Roma, Italia central, mostrando la localización de la ciudad de Tivoli y la cuenca de Acque Albule con la meseta del travertino de Tivoli.



Figura 3. Célula triaxial de alta rigidez y cuerpo de prueba instrumentado con clips gages.

mínimos cuadrados usando los datos del segmento recto pre-pico de la curva tensión deformación (ASTM 7012-13).

RESULTADOS

Caracterización petrológica, química y mineralógica: Macroscópicamente el travertino es una roca de color beige claro con elevada porosidad del tipo vugular y fenestral, siendo definidas diferentes facies, siendo estas: facies Masiva, formada por estratos con espesor de 1 a 5 cm, normalmente densas con una baja porosidad de aproximadamente 5%; Facie Bandeada, formada por estratos de 1 a 5 cm y caracterizada por zonas de porosidad mayor a 6%. La roca presentó una dureza de 3-3.5 en la escala de Mohs y reaccionó fuertemente al ácido clorhídrico frío.

Elemento	M1 %m/m	M 2 %m/m	M 3 %m/m
Ca	47,950	48,839	47,109
C	12,838	12,633	13,001
O	38,514	37,899	39,003
K	0,196	0,000	0,186
S	0,167	0,185	0,143
Sr	0,092	0,115	0,103
H	0,155	0,136	0,177
Fe	0,033	0,170	0,170
N	0,055	0,022	0,109
Total	100	100	100

Tabla 1. Composición química del travertino Romano.

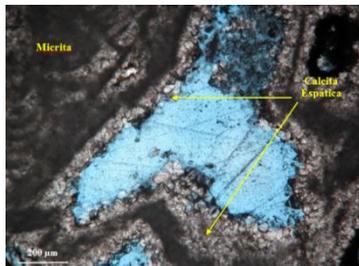


Figura 4. Poro mostrando calcita espática en su superficie y micrita de color gris oscuro en la parte interna.

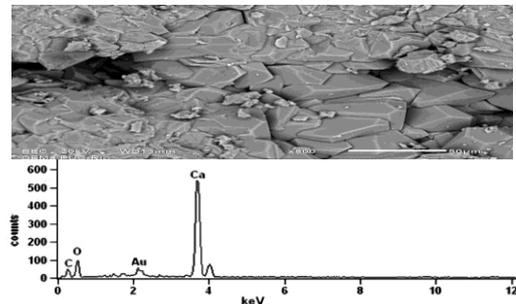


Figura 4. Cristales de calcita sin la presencia de cemento, observadas a través de los resultados SEM, EDS que indican la composición predominante de carbonato de calcio

De acuerdo con los resultados de los análisis de química elemental, difracción de rayos-X y fluorescencia de rayos-X (Tabla 1) la roca es compuesta predominantemente por Ca, C y O (calcita CaCO_3), con trazas de S, Fe, Sr, K, H y N. Microscópicamente el travertino es compuesto por calcita microcristalina o micrita y calcita espática sin la presencia de granos aloquímicos (ooides, oncolito, intraclastos, etc.), esta última principalmente en la superficie de los poros y junto a las estructuras micríticas, presentando una roca calcaría con contacto difuso entre estos componentes y texturas en mosaico cristalino (Figura 4). Los análisis de EDS y las imágenes del SEM confirmaron que la roca es compuesta principalmente por carbonatos de calcio cristalinos de granos no cementados, es decir sin la presencia de cemento entre los cristales de calcita como se muestra en la Figura 4 estos resultados también muestran la presencia de algunas trazas de Al y Na.

De acuerdo con el elevado porcentaje de carbonato de calcio y considerando el poco porcentaje de Mg encontrado, esta roca es clasificada como un carbonato calcítico, esto por la clasificación de rocas carbonáticas que considera a la razón de MgO/CaO (Domingues, 2011).

Mas siguiendo las clasificaciones de Folk (1962) y Riding (2002) el travertino se puede clasificar como una Dismicrita espática o un *Mud Mound Cement reef* respectivamente.

Caracterización de la estructura porosa: El travertino siendo una roca de mineralogía homogénea presenta una compleja estructura porosa, producto probablemente de su génesis. Así el travertino se caracterizó por tener una porosidad efectiva entre 8,4% - 21,5 %, con una masa específica de 2,15 – 2,41 g/cm^3 , lo que refleja la complejidad y heterogeneidad de la estructura porosa de los carbonatos en general.

En el análisis con microscopio óptico se observaron la presencia de poros de geometría irregular, distribuidos de forma dispersa y elevada densidad, distinguiéndose poros con tamaños mayores a 100 micras con baja conectividad (Figura 6).

Los poros de forma esferoide e irregular fueron asociados a la porosidad del tipo vugular, fenestral e intercrystalina (Scholle e Scholle, 2003), los cuales tienen tamaños micrométricos a centimétricos, siendo la microporosidad caracterizada por poros con diámetros inferiores a 100 μm y la macroporosidad por poros con diámetros superiores a 100 μm (García-del-cura, 2012). La muestra porosidad del tipo vugular pero poco conectada, es decir vug-separada (Lucia, 1983). Mas la porosidad del tipo fenestral e intercrystalina presenta una mayor conectividad, siendo este último tipo de poros registrados en el interior de calcita espática, como se muestra en la Figura 5



Figura 6 Distribución dispersa y la geometría irregular de los poros.

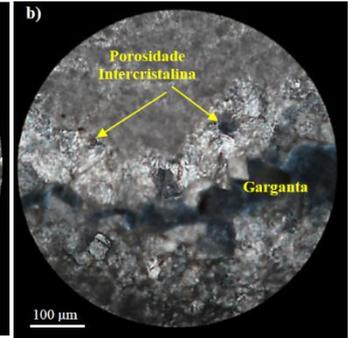


Figura 5 Porosidad Intercristalina en la calcita espática.

De los análisis de las imágenes 2D y 3D generadas por el procesamiento de imágenes del microtomógrafo, se verificó que los poros tienen una gran dispersión, presentando zonas de mayor concentración correspondientes a las facies bandeadas, mas aparentemente con baja conectividad (Figura 8).

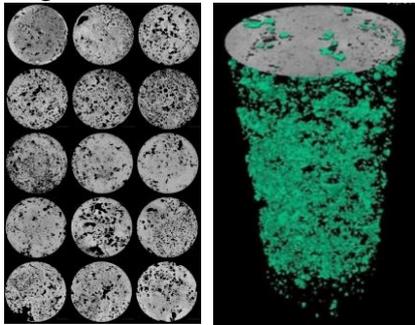


Figura 8. Imágenes 2D y Reconstrucción 3D de los poros internos de la roca generada a partir del procesamiento de imágenes de micro-tomógrafo

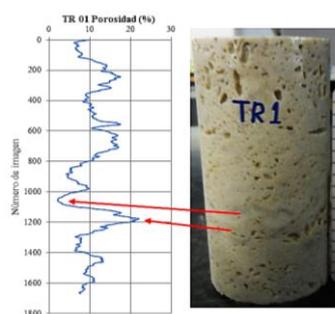


Figura 7. Perfil de la porosidad

Asímismo estas imágenes de Micro-tomógrafo permitieron verificar en cada CP la existencia de poros de gran tamaño, mas sin contacto con la superficie, principalmente del tipo vugular y fenestral, y todo esto sin fracturarlo, siendo esta una de las principales ventajas de esta técnica.

Perfiles de la variación de la porosidad a lo largo de los CP fueron también obtenido del procesamiento de estas imágenes, lográndose percibir fuertes variaciones en la porosidad como se observa en la Figura 7, donde la porosidad varió de un 3% a 23% en aproximadamente 12 mm,

lo cual es un ejemplo de la brusca variación de la porosidad en el CP, mostrando una vez más la complejidad y heterogeneidad de la estructura porosa del travertino, ya que el área de poros debió variar rápidamente en un pequeño espacio.

Haciendo una estadística del diámetro de los poros, se mostró que aproximadamente el 45% de estos corresponden a una porosidad del tipo intercrystalina y el 55 % correspondería a la porosidad del tipo vugular y fenestral, considerando los diámetros establecidos por Knackstedt *et al.* (2006).

Caracterización mecánica: La influencia de la porosidad y de las facies presentes tuvo un papel importante en los resultados de resistencia mecánica del travertino (Tabla 2yTabla 3). La Figura 9 presenta las curvas tensión - deformación del travertino registradas durante el cargamento uniaxial, estos resultados muestran que los CP con menor porosidad tienen mayores valores de resistencia, lo cual podría ocurrir debido a que sus poros admiten mayores deformaciones plásticas sin sobre pasar su límite de resistencia o el colapso de sus poros, tal como aconteció con los CP con elevada porosidad que presentaron bajos valores de resistencia y colapso de sus poros incluso con pequeñas deformaciones. La Figura 10 presenta la resistencia uniaxial en función de la masa específica seca, obteniéndose una relación exponencial entre estas dos propiedades, este comportamiento indica un rápido incremento de la resistencia uniaxial con una pequeña variación de la masa específica seca.

Tabla 2. Resultado de los ensayos uniaxiales

CP	Porosidad efectiva (%)	UCS (MPa)	E (GPa)	Radio de Poisson (ν)
TR 01	8,57	35,98	32,27	0,23
TR 02	8,40	48,04	39,67	0,37
TR 03	11,62	19,31	37,33	0,38
TR 09	13,21	16,32	27,57	0,22
TR 13	14,66	13,26	57,17	0,34

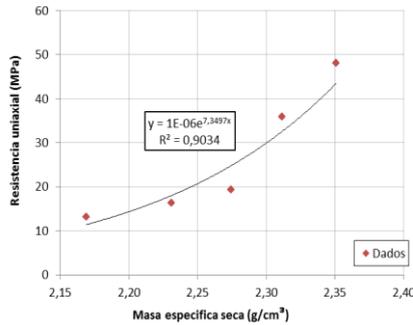


Figura 10. Resistencia uniaxial en función de la masa específica seca

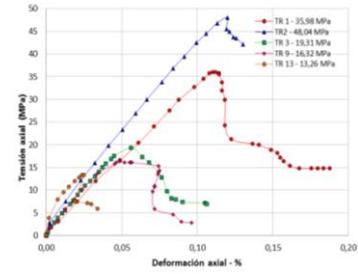


Figura 9. Curva tensión- deformación de los ensayos uniaxiales.

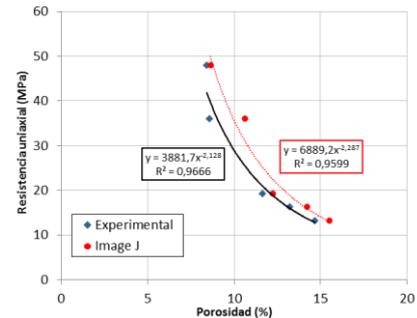


Figura 11. Resistencia uniaxial en función de la porosidad.

En la Figura 11 se puede apreciar resistencia uniaxial en función de la porosidad, indicando un comportamiento no lineal caracterizado por una curva del tipo potencial. Esto indica que la resistencia del travertino decrece rápidamente con el incremento de la porosidad, el mismo comportamiento fue observado por la porosidad obtenida del procesamiento con el programa Image J.

Entonces considerando el comportamiento de la gráfica resistencia uniaxial versus porosidad y el 10% de porosidad como punto de cambio de pendiente de esta curva, se puede admitir que estos cambios de pendientes estarían vinculados a cambios en las características de la estructura porosa, donde una porosidad menor a 10% con una curva de elevada pendiente, estaría asociada a una menor presencia de poros con diámetros > 1 mm dentro del CP, mas valores de porosidad mayores a 10%, mostrando curvas con baja pendiente, estarían asociados a una mayor cantidad de poros presentes en el CP con diámetros superiores a 1 mm (Figura 13).

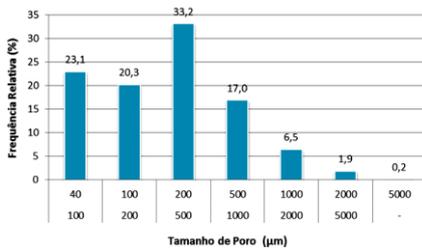


Figura 14. Frecuencia del tamaño de los poros para un CP con porosidad menor a 10%, se puede ver el pequeño porcentaje de poros mayores a 1 mm (porosidad 8.6%).



Figura 12. Propagación de la fractura a través de las puntas de los poros como es descrito en la teoría de Griffith

Figura 13. Cuerpos de prueba (CP) con poros colapsados



implicar un significativo incremento del valor de la porosidad total. Se observó también que la dirección de la fractura es paralela a la dirección de tensión máxima, pero el inicio de estas se dio en las puntas de los poros alargados aparentemente siguiendo el criterio de Griffith (Fossen, 2010) relacionado con el inicio de las fracturas debido a microdefectos (microporos), que indica que la mayor concentración de tensiones estaría en el extremo del microporo con menor radio de curvatura (Figura 14).

Los CP con mayor porosidad presentaron fracturas del tipo fendilamento o agrietamiento con ocurrencia de colapso de los poros en las facies bandeadas, donde la elevada porosidad disminuyó el área de cargamento, permitiendo que las tensiones se concentren en la estructura sólida entre los poros generando posteriormente su destrucción debido al incremento de estas tensiones (Figura 12).

En los ensayos triaxiales, el travertino mostro un incremento de la resistencia con el incremento de la tensión confinante, mas estos resultados también fueron influenciados por la porosidad y la mayor presencia de facies bandeadas como se observa en la Tabla 3y Figura 15. Las curvas tensión deformación también muestran un comportamiento frágil y dúctil en los diferentes CP. Los tipos de fracturamiento observados fueron similares a los registrados en los ensayos uniaxiales con similar dependencia de la porosidad.

Tabla 3. Resultados de los ensayos triaxiales

CP	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	Tensión desv. (MPa)	E (GPa)	Radio de Poisson (ν)	Porosidad (%)
TR 04	22,3	4,14	18,12	22,32	0,23	12,54
TR 05	44,9	6,90	38,03	33,24	0,25	10,84
TR 06	35,3	4,14	31,13	6,10	0,44	9,38
TR 07	52,4	2,76	49,60	36,73	0,28	8,89
TR 08	64,0	5,52	58,53	36,65	0,25	9,02
TR 12	53,3	8,27	44,99	43,52	0,28	14,20

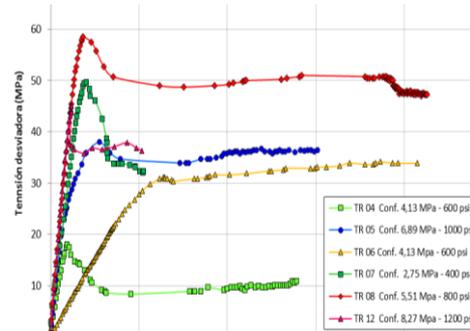


Figura 15. Curvas tensión deformación de los ensayos triaxiales

Considerando la clasificación de roca intacta de Deere y Miller (1966) el travertino es considerado una roca de baja a muy baja resistencia, siendo determinados parámetros característicos de acuerdo a los criterios de resistencia de Mohr - Coulomb, Hoek & Brown y Kim & Lade, cuyos resultados son mostrados en la

Mohr - Coulomb	Hoek e Brown	Kim e Lade
$c = 7,56$ MPa	$m_i = 6,07$	$n = 2,9 \times 10^6$
$\phi = 32^\circ$	$C_0 = 27,06$ MPa	$m = 1,42$
	$s = 1$	
	$a = 0,5$	

Tabla 4. Parámetros para diferentes criterios de resistencia.

Mohr - Coulomb	Hoek e Brown	Kim e Lade
$c = 7,56$ MPa	$m_i = 6,07$	$n = 2,9 \times 10^6$
$\phi = 32^\circ$	$C_0 = 27,06$ MPa	$m = 1,42$
	$s = 1$	
	$a = 0,5$	

CORRELACIONES

A seguir son presentados resultados de diferentes estudios realizadas con diferentes rocas como travertinos turcos, húngaros e de Itaboraí, dolomitas de Turquía y carbonatos de Israel, siendo estos resultados correlacionados con los obtenidos en el presente trabajo.

En la Figura 16 fueron planteados el módulo de Young en función de la porosidad de diferentes de los estudios, observándose decrecimiento del módulo de Young con el incremento de la porosidad, lo que implica que los carbonatos pierden rápidamente su rigidez con el incremento de la porosidad, observándose también que el módulo de Young presenta valores muy bajos para elevados valores de porosidad ($n\% > 30\%$). Nótese también que el travertino Romano tiene un valor de módulo de Young de medio a alto de acuerdo con la nube de puntos, pero el travertino de Itaboraí tiene valores aún más elevados indicando que es más rígido que la mayoría de los carbonatos. Ahora en la Figura 17 son planteados los resultados del módulo de Young versus la resistencia uniaxial, se observa que el travertino romano presenta mayor rigidez que otros travertinos y carbonatos con similar resistencia, siendo esta rigidez mayor en aquellos que presentaron colapso de poros. La Figura 18 muestra, que de modo general la resistencia decrece con el incremento de la porosidad, En esta misma figura se observa el amplio intervalo de variación de la resistencia y la porosidad de los carbonatos. Siendo las calizas, dolomitas y Chalk estudiados por Palchik (2011) las que muestran una mayor dispersión, también se puede observar que los resultados del travertino Romano se localizan en la zona de mayor densidad de puntos de otros travertinos, mostrando una buena coherencia de los resultados con otras investigaciones. En la Tabla 5 se presentan las ecuaciones de regresión y los índices de correlación obtenidos en el presente estudio y de cada uno de los estudios mostrados en la Figura 18. La Figura 19 muestra el gráfico de la correlación

de la resistencia uniaxial como función de la masa específica seca de diferentes carbonatos, mostrando el incremento de la resistencia con el incremento de la masa específica seca. Los resultados del presente estudio tiene un buen ajuste con la nube de puntos, más el travertino de Itaboraí se encuentran poco distantes a pesar de tener una masa específica mayor. La Tabla 6 presenta las ecuaciones de regresión y los índices de correlación obtenidos en el presente estudio y en cada uno de los estudios ploteados en la Figura 19

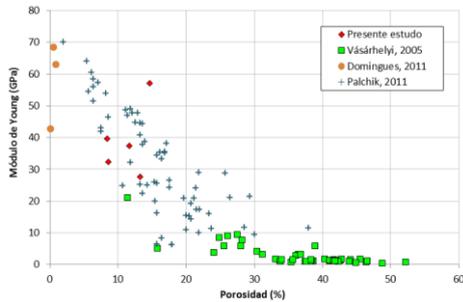


Figura 16. Módulo de Young en función de la porosidad

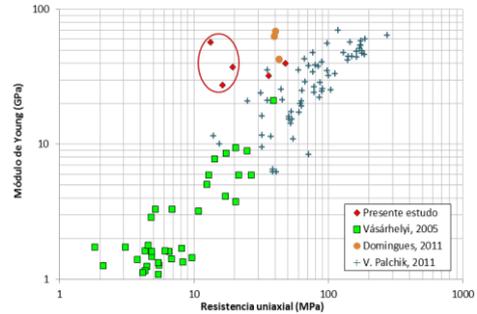


Figura 17. Módulo de Young en función de la resistencia.

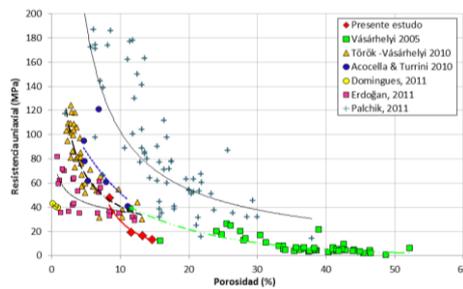


Figura 18. Módulo de Young en función de la resistencia.

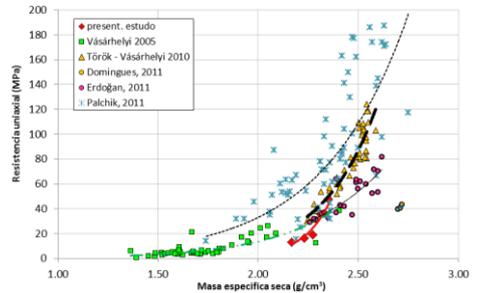


Figura 19 Resistencia uniaxial en función de la porosidad

Tabla 5. Ecuaciones de regresión y coeficientes de correlación de resistencia uniaxial dependiendo de la porosidad de los diferentes estudios.

Ecuación	R ²	Litología	Referencia
$3881,7n^{-2,128}$	0,967	Travertino Romano	Presente estudio
$91,546 e^{-0,072n}$	0,614	Caliza	Vásárhelyi 2005
$204,34n^{-0,7}$	0,763	Travertino Húngaro	Török - Vásárhelyi 2010
$143,55 e^{-0,102n}$	0,436	Travertino	Acocella - Turrini 2010
$39,746 n^{-0,04}$	0,999	Travertino Itaboraí	Domingues 2011
$836,6 e^{-0,91n}$	0,531	Carbonatos	Palchik, 2011
$64,812 n^{-0,245}$	0,425	Travertino Turco	Erdoğan, 2011

Tabla 6. Ecuaciones de regresión y coeficientes de correlación de resistencia uniaxial dependiendo de la masa específica seca de los diferentes estudios.

Ecuación	R ²	Litología	Referencia
$10^{-6} e^{7,350\gamma}$	0,903	Travertino Romano	Presente estudio
$0,0561 e^{2,75\gamma}$	0,641	Caliza	Vásárhelyi, 2005
$0,008 e^{3,172\gamma}$	0,892	Travertino Húngaro	Török - Vásárhelyi, 2010
$0,0006 e^{4,127\gamma}$	0,923	Travertino Itaboraí	Domingues, 2011
$0,2858 e^{2,376\gamma}$	0,597	Carbonatos	Palchik, 2011
$0,1333 e^{2,4\gamma}$	0,749	Travertino Turco	Erdoğan, 2011
$0,0574 e^{2,916\gamma}$	0,741	Travertino Turco	Çobanoğlu & Çelik, 2012

CONCLUSIONES

En este artículo fueron estudiadas las propiedades petrológicas y mecánicas del travertino Romano, el cual en general es un material muy complejo, de difícil descripción, previsibilidad y distribución de sus características como son sus facies, texturas, propiedades petrológicas y estructura porosa.

Travertino romano es clasificado como un carbonato calcítico por su elevado porcentaje de calcio y bajo porcentaje de magnesio, así mismo es compuesto casi totalmente por calcita sin granos aloquímicos. Fueron determinados también dos estructuras o facies, masiva y bandeada con textura microcristalina, micrítica y fibrosa.

La roca presentó una estructura porosa compleja caracterizada por poros del tipo vugular, fenestral (macroporos), intrapartícula e intercristalina (microporos) los cuales presentan baja conectividad y grandes variaciones en el tamaño, distribución y densidad de los poros, presentando una porosidad media de 12.59%.

Según los resultados de resistencia uniaxial el travertino es una roca de baja a muy baja resistencia, siendo sus propiedades mecánicas fuertemente influenciadas por la porosidad, mostrando que los cuerpos de prueba de baja porosidad son más resistentes, presentando fracturas del tipo fendilamiento y cizallamiento, mientras que las rocas de elevada porosidad son menos resistentes, presentando fracturas del tipo fendilamiento con la ocurrencia del colapso de sus poros principalmente en sus facies bandeadas de elevada porosidad.

En los ensayos de compresión triaxial el incremento de la tensión confinante proporcionó el incremento de la resistencia. Este incremento de resistencia es también dependiente de la porosidad, más de modo opuesto a la tensión confinante.

Los parámetros de resistencia del travertino para el ajuste de los criterios de Mohr- Coulomb conducen a un ángulo de fricción $\phi = 32^\circ$ e cohesión $c = 7,561$ MPa. Para el criterio de Hoek & Brown sus parámetros son $m_i = 6,072$, $s = 1$, $a = 0,5$ y $C_0 = 27,056$ MPa, y para el ajuste del criterio de Kim & Lade se tiene los siguientes parámetros $n = 2,9 \times 10^6$ e $m = 1,42$.

Las correlaciones obtenidas de los resultados del presente estudio con otros estudios realizados en diferentes travertinos y carbonatos, muestran que los resultados obtenidos para el travertino romano son coherentes y válidos para este tipo de roca, validándose también el correcto funcionamiento de la célula triaxial usada en los respectivos ensayos de resistencia mecánica.

AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen a la CAPES por el soporte económico durante el presente toda la investigación, al laboratorio de tomografías del CENPES / Petrobras, por la contribución para la realización de las tomografías y al equipo técnico de la empresa Martins & Campelo de Belo Horizonte en Minas Gerais y a Guillermo Ibáñez por el apoyo en la realización de los ensayos de resistencia mecánica.

REFERENCIAS

1. Acocella, A.; Turrini, D. (2010) *Formation, appearance and characterization of travertine: in Siense travertine*. Alinea, Florence, 303p. Disponível em: <http://issuu.com/materialdesign/docs/travertino_tutto_doppiopag/9>. Acesso em: 17 jan. 2014.
2. Ahr, W. M.; Allen, D.; Boyd A.; Bachman, H. N.; Clerke, E. A.; Smithson, T.; Gzara, K.; Hassall, J.; Murty, C.; Zubari, H.; Ramamoorthy, R. (2005) Confronting the carbonate conundrum. *Schlumberger Oilfield Rev.* p. 18 – 29.
3. ASTM 7012-13, (2013) Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimen under Varying States of Stress and Temperatures, *American Section of the International Association for Testing Materials*, 9 p.
4. Bieniawski, Z. T.; Bernede, M.J. (1979) Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining. Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 16, n. 2, p. 135-140.
5. Çobanoğlu, İ.; Çelik, S. B. (2012) Determination of strength parameters and quality assessment of Denizli travertines (SW Turkey). *Engineering Geology*, v. 129-130, p. 38–47.
6. Chafetz H. S., Folk R. L., (1984) Travertines: Depositional Morphology and the Bacterially Constructed Constituents, *Journal of Sedimentology Petrology*, vol. 54, p. 289– 316.
7. Dana, J. D.; Hurlbut C. S. (1960) *Manual de Mineralogia*, 2.ed. Mexico: Reverté, 578p.
8. Das, B. M. (2011) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. Tradução EZ2Translate. 7. ed. São Paulo: Cengage learning. p. 331-385.
9. Deer D. U., Miller R. P., (1966) Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock, University of Illinois, pp 135-160.
10. Domingues, D. L. P. (2011) *Caracterização geológica e Geomecânica de Travertinos*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade de Católica de Rio de Janeiro, 315 p.

11. Dunham, R.J. (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. Classification of carbonate rocks. *American Association of Petroleum Geology Memoir 1*. p. 108–121.
12. Embry, A. F.; Klován, J. E. (1971) A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. *Bulletin of Canadian Petroleum Geologists*, vol. 19, p. 730-781.
13. Erdoğan, Y. (2011) Engineering properties of Turkish travertines, *Scientific Research and Essays*, v. 6(21), p. 4551-4566.
14. Faccenna, C., Soligo M., Billi A., Filippis L., Funicello R., Rossetti C., Tuccimei P. (2008) Late Pleistocene depositional cycles of the Lapis Tiburtinus travertine (Tivoli, Central Italy): Possible influence of climate and fault activity, *Elsevier Global and Planetary Change*, Volume 63, Issue 4, pp 299–308
15. Fairhurst, C. E.; Hudson, J. A. (1999) Suggested Method for the Complete Stress- Strain Curve for Intact Rock in Uniaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 36, n. 3, p. 297-289.
16. Filippis L., Anzalone E., Billi A., Faccenna C., Poncia P. P., Sella P., (2013) The origin and growth of a recently-active fissure ridge travertine over a seismic fault, Tivoli, Italy, *Elsevier Geomorphology 195*, p13-26.
17. Folk, R. L., (1962) Classification of Carbonate Rocks: Spectral subdivision of limestone types, Symposium AAPG pp 62-84.
18. Fossen H., (2010) *Structural Geology*, Cambridge University Press, 480 p.
19. Franklin, J. A. Vogler, u. w., Szlavín, j., Edmond, j. m., Bieniawski, z.t., (2007) Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties: in *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*, p. 83-98.
20. García-del-Cura M.À., Benavente D., Martínez J., Cueto N., (2012) Sedimentary structures and physical properties of travertine and carbonate tufa building stone, *Elsevier, Construction and Building Materials* vol. 28, 456p–467p.
21. Goodman R. E., (1989) *Introduction to rock Mechanics*, John Wiley & Sons, 2° edition, 562p.
22. Kim M.K.; Lade P.V. (1984) Modelling Rock Strength in Three Dimensions. *Journal Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics*. v. 21, n. 1, p. 21-33.
23. Knackstedt M.A., Arns C. H., Ghouse A., Sakellariou A., Senden T. J., Sheppard A.P., Sok R. M., Nguyen V., Pinczewski W. V., (2006) 3D imaging and characterization of the pore space of carbonate core; implications to single and two phase flow properties, *SPWLA 47th Annual Logging Symposium*, 15 p.
24. Lucia F. J., (1983) Petrophysical Parameters Estimated From Visual Descriptions of Carbonate Rocks: A Field Classification of Carbonate Pore Space, *Journal of Petroleum Technology*, Society of Petroleum Engineers, vol. 35, pp 629-637.
25. Lucia, F.J. (1999) *Carbonate Reservoir Characterization*. Germany: Springer. p. 24-32.
26. Minissale A., Kerrick D.M., Magro G., Murrell M.T., Paladini M., Rihs S., Sturchio N.C., Tassi F., Vaselli O. (2002) Geochemistry of Quaternary travertines in the region north of Rome (Italy) :structural, hydrologic and paleoclimatic implications, *Elsevier*.
27. NBR 12766 (1992) Rochas para revestimento - Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente - Método de ensaio, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 2 p.
28. Palchik, V. (2011) Technical note: On the Ratios between Elastic Modulus and Uniaxial Compressive Strength of Heterogeneous Carbonate Rocks. *Rock. Mech. Rock. Eng. Springer*, v. 44, p. 121 – 128.
29. Pentecost, A.; Viles H. (1994) A Review and Reassessment of Travertine Classification. *Géographie physique et Quaternaire*, v. 48, n. 3, p. 305-314.
30. Riding, R., (2002) Structure and composition of organic reefs and carbonate mudmounds: concepts and categories, *Elsevier*, pp 163–231.
31. Schlumberger (2009). *Annual report 2009*, p 1-15.
32. Scholle P.A., Scholle D.S.U., (2003) A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis, *AAPG Memoir 77*, Tulsa, Oklahoma, U.S.A.
33. Terra, G. J. S.; Spadini, A.; França, A.; Sombra, C.; Zambonato, E.; Juschaks, L. C.; Arienti, L.; Erthal, M.; Blauth, M.; Franco, M. (2010) Classificação de rochas carbonáticas aplicáveis às bacias sedimentares brasileiras, *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 9-29.
34. Török, Á. (2006) Influence of fabric on the physical properties of limestone, in: Fracture and failure of natural building stone. *Springer, Dordrecht*. p. 487–495.
35. Török, Á; Vásárhelyi, B. (2010) the influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology*, v. 115, p. 237–245.
36. Vasárhelyi, B. (2005) Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone. *Rock Mechanics - Rock Engineering*, v. 38, p. 69–76.
37. Wawersik W.R. (1968) *Detailed analysis of rock failure in laboratory compression tests*. Minnesota, 165p. Thesis of doctor of philosophy - University of Minnesota.

1. Introducción

El estudio de los yacimientos carbonáticos es actualmente un gran desafío por la fuerte heterogeneidad y anisotropía que estos presentan, además la poca accesibilidad a cuerpos de prueba de estas formaciones con fin de estudiar estas formaciones, complica aun más esta situación. En tal sentido se hace necesario empleo de nuevos métodos, con objetivo a validar estas formaciones carbonáticas y determinar parámetros físicos y mecánicos. Uno de estos métodos consiste en efectuar estudios en rocas carbonáticas análogas, como es el caso del travertino, roca carbonática usada para validar las rocas reservorio del pre-sal en Brasil (Dominguez, 2011), en este trabajo fue estudiado el travertino romano, el cual fue sometido a diferentes análisis y ensayos a fin de determinar sus diferentes propiedades y parámetros.

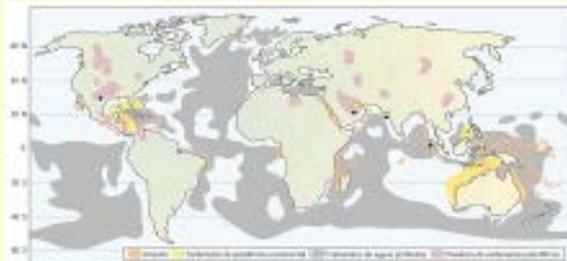


Figura 1. Distribución mundial de las reservas en carbonatos (Ahret et al., 2005).

2. Geología del travertino Romano

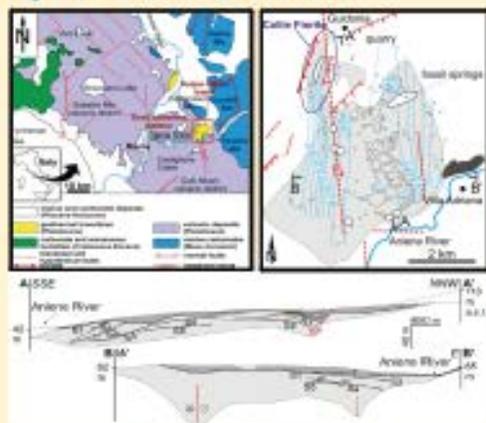


Figura 2. Mapa Geológico de Tivoli y secciones transversales de los depósitos de travertino Romano (Modificado Filippis et al., 2013).

3. Metodología

Para el presente estudio fue utilizado un bloque de travertino Romano, y la metodología empleada consistió en: preparación de los cuerpos de prueba y muestras para los diferentes ensayos, caracterización de la roca (análisis petrológico, mineralógico y químico, tomografías de rayos-X determinación de índices físicos, y ensayos de resistencia mecánica uniaxial y triaxial), análisis y presentación de resultados.



Figura 3. (a) Láminas delgadas, (b) Muestras de mano y (c) Cuerpos de prueba de travertino Romano usados en cada uno de los ensayos. (d) Célula triaxial y (e) Sensores usados en los ensayos de resistencia Mecánica.

4. Resultados

Elemento	wt %	wt %	wt %
Ca	40,000	40,000	40,000
C	10,000	10,000	10,000
O	30,000	30,000	30,000
S	0,000	0,000	0,000
P	0,000	0,000	0,000
K	0,000	0,000	0,000
Fe	0,000	0,000	0,000
Mg	0,000	0,000	0,000
Total	100	100	100

Tabla 1. Composición química de travertino Romano

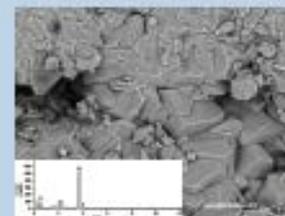


Figura 4. Cristales de calcita, observadas a través de los resultados SEM, EDS indica la composición predominante de carbonato de calcio.



Figura 5. Reconstrucción 3D, perfil de la porosidad generados a partir del procesamiento de imágenes de micro-tomografía e imágenes del análisis microscópico.

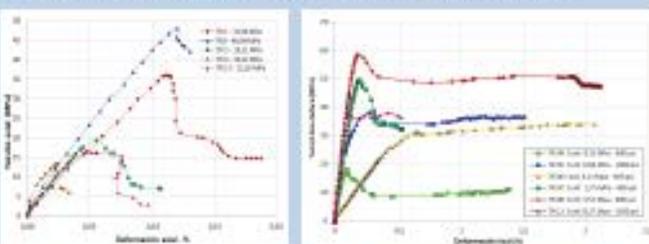


Figura 6. Curvas tensión deformación para estado de tensiones uniaxial y triaxial.

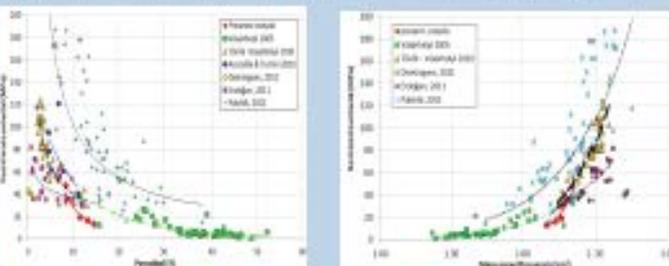


Figura 7. Tendencia de los resultados y comparaciones con otros estudios.

5. Conclusiones

El travertino Romano es un material muy complejo, de difícil descripción, previsibilidad y distribución de sus características, como son: sus facies, texturas, propiedades petrográficas y estructura porosa. El Travertino fue clasificado como un carbonato cálcico por su gran contenido de Ca respecto al de Mg. Se definieron sus estructuras o facies, masiva y bandeada con textura microcristalina, micrítica y fibrosa. Mostrando una estructura porosa compleja caracterizada por poros del tipo vulgar, fenestral (macroporos), intrapartícula e intercristalina (microporos) presentando una porosidad media de 12.58%. El travertino es una roca de baja a muy baja resistencia, siendo esta resistencia influenciada por la porosidad, se obtuvo fracturas del tipo fendimiento y deslizamiento. Rocas de elevada porosidad presentan fracturas del tipo fendimiento con la ocurrencia del cado de sus poros. Los parámetros de resistencia obtenidos según los criterios de Mohr-Coulomb conducen a un ángulo de fricción $\phi = 32^\circ$ e cohesión $c = 7,56$ MPa. Para el criterio de Hoek & Brown sus parámetros son $m_i = 6,07$, $s = 1$, $a = 0,5$ y $C_0 = 27,06$ MPa, y para el ajuste del criterio de Kim & Lade se tiene los siguientes parámetros $\alpha = 2,9 \times 10^{-6}$ e $m = 1,42$.