

Influencia del Histórico de la Trayectoria de Tensiones en la Resistencia de Materiales Frágiles



Napa G.F. & Trejo P.C.

Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil

Bortolucci A.A. & Celestino T.B.

Departamento de Geotecnia – Escola de Engenharia São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil

ABSTRACT

The main objective of the paper is to analyze the influence of different stress paths on the final strength of brittle material by means of tests with two loading stages in different directions. The material selected was mortar due to its rock-like character and the possibility of repeatability. In the first loading stage, large prismatic specimens were loaded to 90% of their unconfined compressive strength, when severe axial cracking is expected to take place. All the tests were monitored with qualitative acoustic emission in order to detect the cracking phenomenon. From the cracked prismatic specimens, cylindrical specimens were cored at different orientations. The cylindrical specimens were therefore pre-cracked at different orientations. In the second loading stage, they were all taken to failure, also under uniaxial compression.

The variation of final strength with the previous crack orientation was analyzed based on damage mechanics and fracture mechanics.

RÉSUMÉN

El principal objetivo de este trabajo es analizar la influencia de diferentes trayectorias de tensiones en la resistencia final del material frágil a través de ensayos con dos etapas de carga en diferentes direcciones. El material seleccionado fue un mortero debido a sus características similares a la roca y la posibilidad de repetibilidad. En la primera etapa de carga, especímenes prismáticos de grandes dimensiones fueron cargados al 90% de su resistencia de compresión uniaxial (UCS), esperando severas grietas axiales. Todos los ensayos fueron monitoreados con emisión acústica cualitativa para el fenómeno de fisuramiento. De los especímenes prismáticos fisurados, especímenes cilíndricos fueron retirados en diferentes direcciones. Por lo tanto los especímenes cilíndricos fueron prefisurados en diferentes direcciones. En la segunda etapa de carga, todos estos especímenes fueron llevados a la ruptura, bajo el ensayo de compresión uniaxial.

La variación de resistencia final con la previa orientación de la fisura fue analizada con base a la mecánica del daño y mecánica de la fractura.

1 INTRODUCCIÓN

La construcción de obras civiles que envuelven un macizo rocoso genera cambios en su estado de tensiones interno. Estos cambios pueden ser evaluados cualitativamente y medidos cuantitativamente en casos tales como taludes altos de minería y túneles, entre otras estructuras geotécnicas.

Un macizo rocoso sano presenta microdefectos de manera natural, pero cuando este macizo ha sido sometido a un estado de tensiones, y con mayor razón, a condiciones de concentración de tensiones, este desarrollará cierto grado de microfisuramiento o “daño”, ahora si el estado de tensiones sufre cambios, el microfisuramiento previo evidentemente influenciará en el comportamiento mecánico e hidrogeológico global del macizo rocoso al respecto del nuevo estado de tensiones (Eberhardt et al., 1999).

Existe en la literatura un gran número de casos de ruptura de taludes de mina de gran altura (más de 500 m de altura), los cuales aparentemente no deberían haber ocurrido según los parámetros del macizo rocoso adoptados (Eberhardt, 2001; Zea, 2004). Zea (2004) sugiere que estas rupturas de taludes de gran altura podrían ser debidas a un daño en el macizo rocoso

durante la construcción progresiva del talud que origina una serie de cambios en los estados de tensiones en el mismo y por tanto un “daño” acumulado.

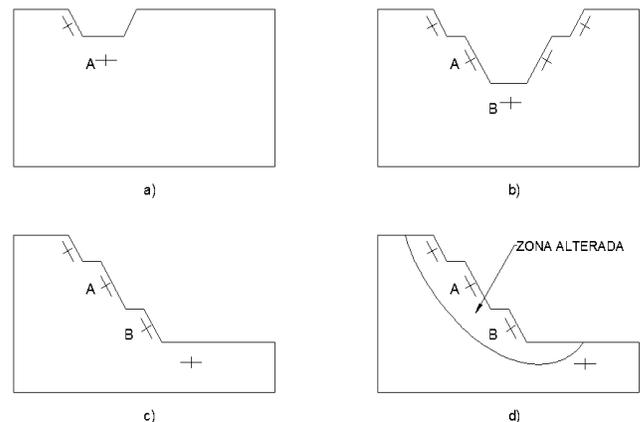


Figura 1. Cambio de estado y concentración de tensiones en un proceso de construcción de talud de gran altura, evidencia de una zona de propiedades alteradas.

En la Figura 1 se evidencia en los puntos A y B el cambio en la dirección de las tensiones principales, el comportamiento del macizo en cada una de las etapas es diferente y más aún depende de las tensiones anteriores debido al estado de microfisuramiento producido por estas.

Pehovaz-Alvarez (2004) reconoce que las grietas en el concreto, roca y materiales cerámicos modernos exhiben fuertes similitudes, razón por la cual fue escogido el mortero como material para este estudio.

Eberhardt (1999) establece a través de ensayos de laboratorio de resistencia a la compresión simple (RCS) con medición de emisión acústica en muestras de roca frágil las etapas de fisuramiento de este tipo de material basado en comportamientos deformacionales de los cuerpos de prueba, sugiriendo valores porcentuales de carga para identificar los límites de dichas etapas.

Entre los principales valores obtenidos, se puede resaltar los siguientes valores:

- De 0 a 23% ± 2% de RCS, se presenta el cierre de las microfisuras existentes.
- De 23 a 39% ± 3% de RCS, se presenta un comportamiento “elástico” del material.
- En 39% ± 3% de RCS, se presenta el comienzo de la generación de nuevas fisuras.
- De 39 a 51% ± 3% de RCS, evolución de nuevas fisuras.
- De 51 a 65% ± 4% de RCS, coalescencia de fisuras.
- De 65 a 75% ± 5% de RCS, propagación de daño en el material.

La figura 2 muestra las etapas de evolución de las microfisuras.

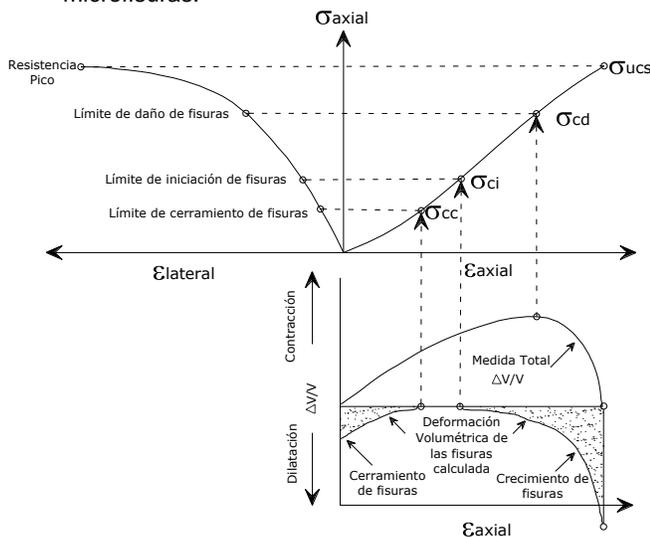


Figura 2 Etapas de Fisuramiento (Eberhardt, 1999).

Varios autores han investigado sobre la propagación de las microfisuras en materiales frágiles (Heap, Vinciguerra & Meredith, 2009, Hoek & Bieniawski, 1965; Lajtai, 1971; Peng & Johnson, 1972; Huang, Wang & Zhao, 1993, Wong; Einstein, 2009, Yang et al., 2008, Zhou, 2007) y han concluido que esta se da en la

dirección del esfuerzo principal mayor; por consecuencia, si se realizan ensayos de compresión simple las microfisuras propagarán en la dirección de la carga aplicada, usualmente la dirección vertical. La ruptura final del cuerpo de prueba es una consecuencia de este microfisuramiento y de la posterior coalescencia de los microfisuras. La ruptura de un cuerpo de prueba ocurre en un plano inclinado a $45^\circ + \phi/2$ con respecto a la horizontal, donde ϕ es el ángulo de fricción interno del material. La figura 3 muestra el proceso de coalescencia de las microfisuras en la ruptura de un material frágil.

Como fue expuesto por Eberhardt (1999), cuando unas microfisuras preexistentes se encuentran orientadas con un ángulo de inclinación diferente al plano de rupturas, estas van a desarrollarse según trayectorias curvilíneas hasta alinearse con el plano de ruptura del material ($45^\circ + \phi/2$). Los autores sugieren que cuando las microfisuras se encuentren orientadas en un ángulo más lejano del plano de ruptura, mayor será la resistencia macro del elemento ensayado, y por negación cuando las microfisuras se encuentren orientadas más cerca del ángulo del plano de ruptura, la resistencia será menor; esto debido a que las microfisuras deberían realizar una menor cantidad de trabajo cuando las microfisuras estén orientadas mas alineadas a plano de ruptura final.

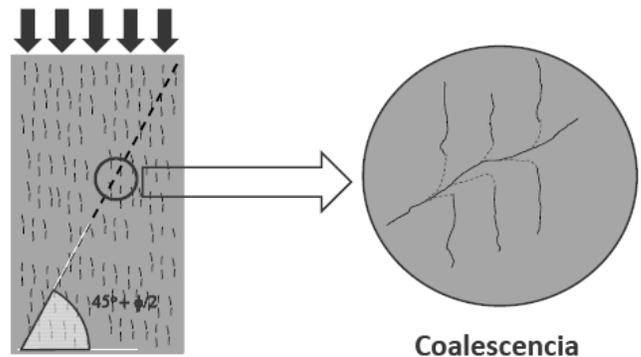


Figura 3. Propagación curvilínea de las microfisuras orientadas con un ángulo diferente al plano de ruptura final.

La emisión acústica es un fenómeno mecánico de propagación de ondas generado por una ruptura en un material, para entender mejor este fenómeno se podría hacer una similitud con un sismo en el cual una ruptura o dislocamiento brusco en una zona de falla produce una expulsión de energía mecánica la cual se propaga hasta la superficie. Este fenómeno es aprovechado para estudiar el comportamiento de los materiales, midiendo estos eventos cualitativa y cuantitativamente, a través del número de eventos y el tipo de evento respectivamente.

El principal objetivo de este estudio es investigar la influencia de la trayectoria de tensiones anteriores en la resistencia final de un material frágil a través de ensayos con dos etapas de carga en dos direcciones distintas. Fueron aplicadas cargas de daño previas con la intención de crear microfisuras en diferentes orientaciones. Como el material microfisurado a lo largo de una dirección preferencial es anisotrópico, la obtención del grado de anisotropía creado por la pre-carga es un objetivo secundario. Solamente la influencia

de la rotación de los esfuerzos principales fue investigada para caracterizar la trayectoria de tensiones anterior. Fue determinada la orientación de la carga de daño previa que envolvía el menor gasto de energía para alcanzar la ruptura final.

2 METODOLOGIA DE TRABAJO

Un grupo de ensayos fue ejecutado consistiendo en ensayos de resistencia a la compresión simple con dos etapas de carga en direcciones distintas. Cuando fue posible, los ensayos fueron monitoreados usando emisión acústica cualitativa.

El diseño del mortero fue definido como sigue: relación de cemento: agregado = 1:2 y relación agua: cemento= 0.4. Fueron elaborados 12 especímenes prismáticos de dimensiones de 15x15x50cm y 6 especímenes cilíndricos Ø5x10cm empleados en la caracterización del mortero. Después de 35 días de cura, tres especímenes prismáticos fueron cargados hasta la ruptura en una máquina servo-controlada con 2700 kN de capacidad (MTS-815). En la figura 4 es mostrado el cuerpo de prueba prismático de haber sido precargado.



Figura 4. Cuerpo de prueba prismático después de haber sido llevado al 90% de RCS.



Figura 5. Esquema del equipo para la extracción de los cuerpos cilíndricos con inclinación de 45° en cuerpos prismáticos.

Posteriormente, otros especímenes prismáticos intactos fueron cargados hasta 90% RCS y descargados inmediatamente. Fueron extraídos 11 especímenes cilíndricos Ø5x10cm, con inclinaciones de 45° y 60° con respecto al eje de los prismas llevados hasta el 90%RCS y también de prismas intactos. La figura 5 muestra el esquema de extracción de los cuerpos de prueba cilíndricos inclinados a 45°.

El siguiente paso fue ejecutar los ensayos de RCS en los cuerpos de prueba cilíndricos extraídos de los cuerpos de prueba prismáticos monitoreados con sensores de emisión acústica (EA). Esta técnica permite monitorear el desarrollo y progreso del proceso de fisuramiento. El esquema de posicionamiento de los sensores de emisión acústica puede ser observado en la figura 6 y es detallado en la Tabla 1.



Figura 6. Cuerpo de prueba cilíndrico extraído de cuerpo de prueba prismático monitoreado con 4 sensores de emisión acústica y un extensómetro radial.

Tabla 1. Ubicación y características de los sensores de emisión acústica.

Canal	Ganancia	Frecuencias
#	Hz	Hz
1	40	20-100
2	40	100-400
3	60	20-100
4	60	100-400

3 RESULTADOS E ANÁLISIS

El mortero, caracterizado en los cuerpos de prueba cilíndricos de 5cm de diámetro, presentó una resistencia a la compresión de 61.7MPa y resistencia a la tracción indirecta obtenida a través del ensayo brasileño de 2.7MPa. La resistencia a la compresión simple promedio de los especímenes prismáticos fue de 44.4kPa, como se muestra en la figura 7.

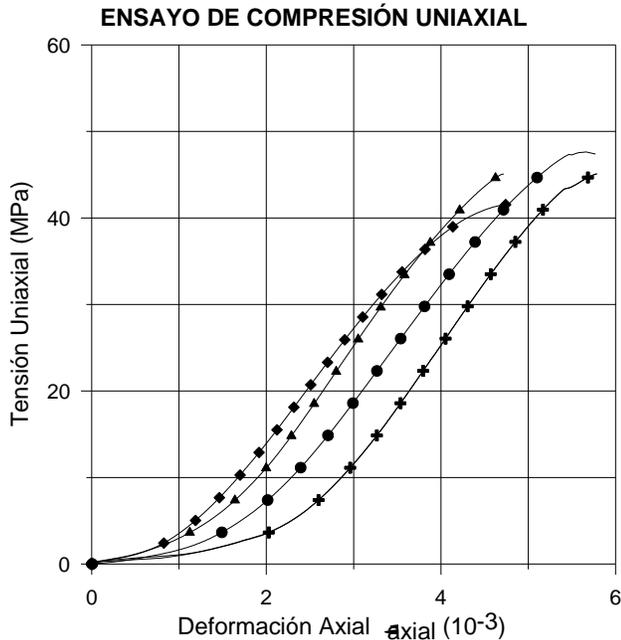


Figura 7. Ensayo de RCS en cuerpos de prueba prismáticos.

Una vez obtenida la RCS promedio para los cuerpos de prueba prismáticos, otros cuerpos de prueba prismáticos fueron llevados hasta el 90% de RCS considerando que este nivel de carga produciría daño en material pero no lo llevaría hasta la ruptura. Posteriormente, fueron extraídos cuerpos de prueba cilíndricos de los prismáticos en números de: 3 de material intacto y 8 de material precargado, de los cuales 4 estaban inclinados 45° con respecto al plano de tensiones menores y 4 inclinados a 60°. La Tabla 2 resume los ensayos realizados.

Tabla 2 Cuerpos de prueba cilíndricos extraídos de los cuerpos de los prismáticos.

Condición	Cuerpo de prueba		
	1	2	3
Intacto 45°	CPI1	CPI2	CPI3
Precargado 45°	CPD1	CPD2	CPD3
Precargado 60°	CPDD1	CPDD2	CPDD3

A continuación la Tabla 3 resume los resultados obtenidos en laboratorio para los especímenes ensayados. Los cuerpos de prueba CPI se refieren al material intacto (Figura 8 y Figura 9), CPD son los materiales con precarga a 45° (Figura 10) y CPDD son los testigos inclinados a 60° con respecto al plano de tensiones menores (Figura 11), con la particularidad de que estos últimos no pudieron ser extraídos con la relación altura diámetro adecuada. En lo concerniente al conteo de eventos se obtuvieron valores dispersos de hasta 30 mil eventos.

Tabla 3. Resultados más representativos de los cuerpos de prueba cilíndricos.

Cuerpo de prueba #	RCS MPa	Deformación Axial en la ruptura mm/mm
CPI	49.3	0.008
CPD	44.6	0.007
CPDD	46.7	0.006

De los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio se observa que las deformaciones axiales en la ruptura disminuyen a medida que las microfisuras preexistentes se aproximan a la inclinación del plano de ruptura final del material. En cuanto a la resistencia del material, se confirma una mayor resistencia del material intacto, pero contrariamente a lo que se suponía, la resistencia del material cuando las microfisuras preexistentes se encuentran más cerca del plano de ruptura final, a 60°, presenta una resistencia mayor que cuando están inclinadas a 45°. Las mediciones de emisión acústica presentan una gran variación con respecto al orden de grandeza del número de eventos, posiblemente debido a deficiencias en el proceso de instalación de los sensores, pero cuando estos valores son normalizados con respecto al número total de eventos en la ruptura exhiben una gran coherencia y concordancia en su comportamiento, mostrando también etapas de propagación de las microfisuras. Debido a este comportamiento, fue decidido analizar cualitativamente los resultados.

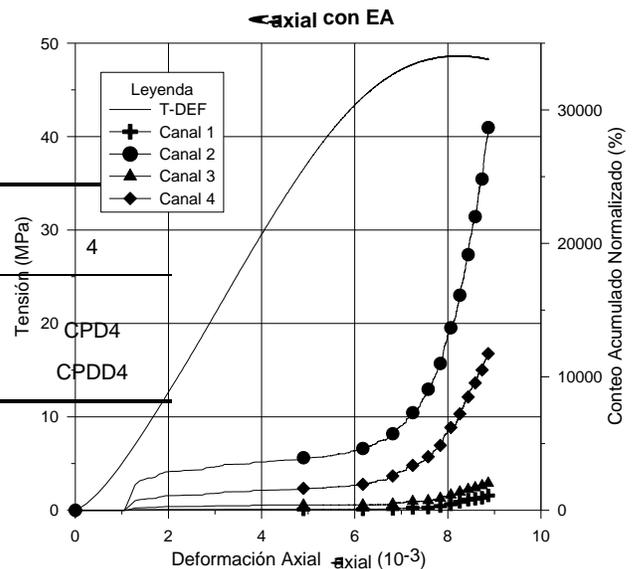


Figura 8. Ensayo de RCS en el CPI2 con emisión acústica.

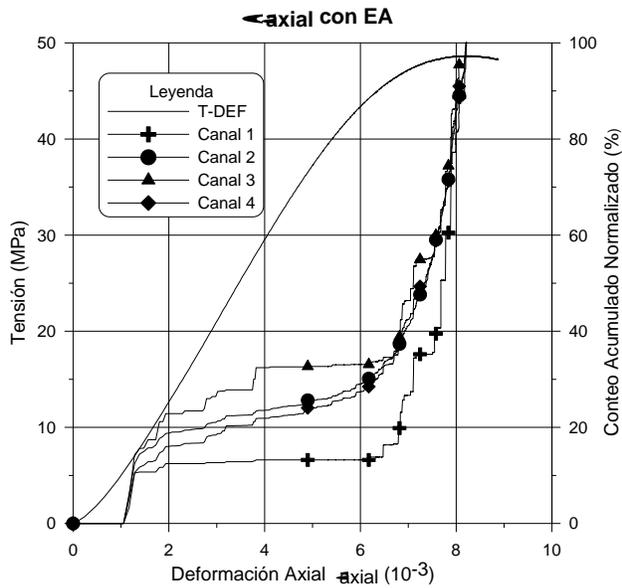


Figura 9. Ensayo de RCS en el CPI2 con emisión acústica normalizada.

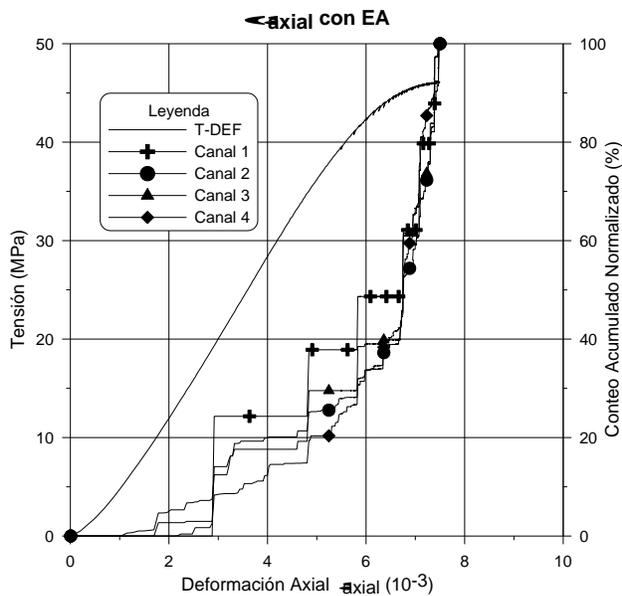


Figura 10. Ensayo de RCS en el CPD4 con emisión acústica normalizada.

Para analizar el comportamiento del material fue realizada una comparación cualitativa de los resultados obtenidos a través de la normalización de las tensiones, deformaciones y conteo acumulado de emisión acústica con respecto a las condiciones de ruptura.

Del análisis comparativo se pueden extraer dos conclusiones importantes; primero que el área bajo las curvas conteo acumulado – deformación disminuye ($A_{60^\circ} < A_{45^\circ} < A_{0^\circ}$) a medida que la inclinación de las microfisuras preexistentes se aproxima al plano de inclinación de ruptura final del material ($45^\circ + \varnothing/2$, siendo

\varnothing el ángulo de atrito del material), y segundo, que la propagación de las microfisuras comienza de manera más tardía cuando las microfisuras se encuentran orientadas más cerca del plano de ruptura final y presentan una evolución más rápida también hasta la condición de ruptura. A medida que la deformación evoluciona aproximándose a la deformación de ruptura, la tasa de propagación de eventos aumenta, identificando de esa forma una etapa inestable de fisuramiento. En el trecho final, el conteo de eventos presenta una tasa similar en los 3 casos, lo cual refleja que la tasa de propagación durante la coalescencia de las microfisuras es coherente debido a que analizamos el mismo material. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 12.

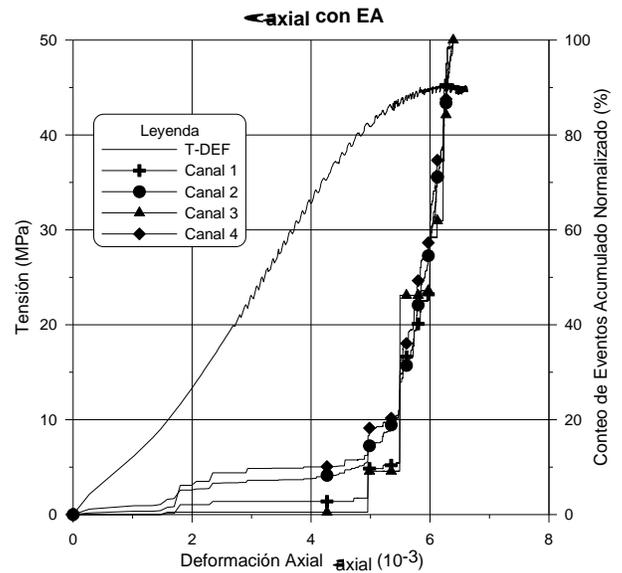


Figura 11. Ensayo de RCS en el CPDD3 con emisión acústica normalizada.

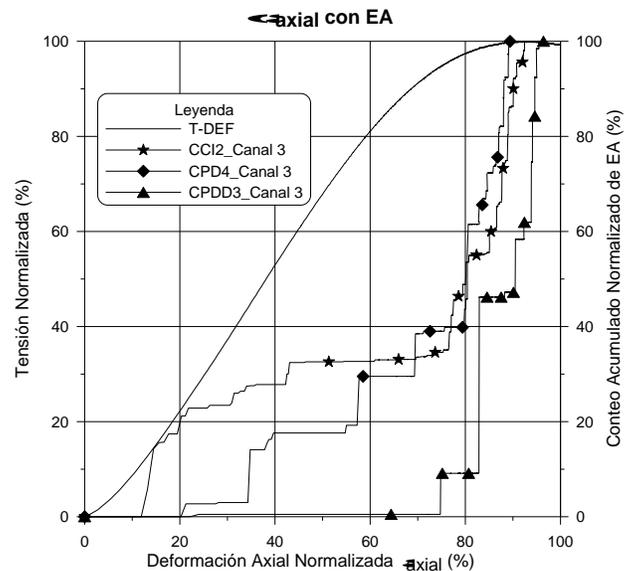


Figura 12. Análisis comparativo normalizado de resultados.

4 CONCLUSIONES

La evaluación de los procesos de fracturamiento en materiales frágiles en laboratorio permite un mejor entendimiento de los esfuerzos inducidos que actúan en un macizo in situ. Y como la concentración de esfuerzos puede generar un daño en el macizo rocoso y por tanto una degradación de las propiedades del macizo.

Existe consistencia entre los datos de esfuerzo-deformación y la respuesta de emisión acústica en términos de identificación cualitativa de fisuramiento en los especímenes ensayados. Las emisiones acústicas proporcionan una medida directa de la propagación del daño a través de la medición de la tasa de eventos.

A medida que la deformación evoluciona aproximándose a la deformación de ruptura, la tasa de propagación de eventos aumenta, identificando de esa forma una etapa inestable de fisuramiento.

De los análisis realizados con base en los ensayos de laboratorio se puede concluir que la orientación de las microfisuras preexistentes en un material frágil predispone el comportamiento tensión – deformación del mismo, así como su resistencia final. Lo anterior, podría justificar el comportamiento de los taludes de gran altura y por tanto debería ser llevado en consideración para realizar una reducción de los parámetros de resistencia basándose en la mecánica del daño.

Como experiencia para futuras investigaciones en este campo una consideración es la fijación de los sensores de emisión acústica al espécimen es de mucha importancia para brindar una mejor confiabilidad de la medición del número de eventos. En este caso, los autores decidieron trabajar con valores AE normalizados para resolver este problema. Otra consideración es realizar un análisis de los registros de emisión acústica para poder obtener los límites de las etapas de fisuramiento.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los técnicos de los Laboratorios de Mecánica de Rocas, Laboratorio de Estructuras y al Laboratorio de Materiales Avanzados en Cemento, todos de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos, Universidad de Sao Paulo. El trabajo de investigación presentado en este artículo fue financiado por el CNPq (Consejo Nacional de Pesquisa-Brasil)

REFERENCIAS

- Eberhardt, E. (2001). **Numerical modelling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v.38, n.4, p.499-518.
- Eberhardt, E.; Stead, D.; Stimpson, B. (1999). **Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v.36, n.3, p.361-380.
- Heap, M.J.; Vinciguerra, S.; Meredith, P.G. (2009). **The evolution of elastic moduli with increasing crack damage during cyclic stressing of a basalt from Mt. Etna volcano**. Tectonophysics, v.471, n.1-2, p.153-160.
- Hoek E, Bieniawski Z.T. 1965. Brittle fracture propagation in rock under compression Int J Fracture Mech 1965;1(3):137±55.
- Huang, J.; Wang, Z.; Zhao, Y. (1993). **The development of rock fracture from microfracturing to main fracture formation**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v.30, n.7, p.925-928.
- Lajtai E.Z. 1971. A theoretical and experimental evaluation of the Griffith theory of brittle fracture Tectonophysics 1971;11:129±56.
- Pehovaz-Alvarez, I.A. (2004). **Ensaio não convencionais para a determinação da tenacidade à fratura em rochas**, Departamento de Geotecnia, EESC-USP, São Carlos, 238 pp.
- Peng S, Johnson A.M. 1972. Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 1972;9(1):37±86.
- Wong, L.N.Y.; Einstein, H.H. (2009). **Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v.46, n.2, p.239-249.
- Yang, S.Q. et al. (2008). **Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression**. International Journal of Solids and Structures, v.45, n.17, p.4796-4819.
- Zea, R.E.H. (2004). **Mecanismos de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto**, Departamento de Geotecnia, EESC, USP, São Carlos, 132 pp.
- Zhou, X.P. (2007). **Microcrack interaction brittle rock subjected to uniaxial tensile loads**. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, v.47, n.1, p.68-76.