



Modelagem Numérica do Comportamento Mecânico de Travertino Baseada em Ensaio Geomecânicos de Plugs Verticais
Numerical Modelling of Travertine Mechanical
Behaviour Based on Rock Mechanics Tests of Vertical Plugs

Melissa Cristina Duque Nogueira Kiewiet^{1,2}; Emilio Velloso Barroso²;
Flávia de Oliveira Lima Falcão¹; Anderson Moraes¹; Leigh Hessel Kiewiet³ & Shane Kager³

¹ PETROBRAS/CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. M. de Mello.

Av. Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária. 21941-915, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências,

Departamento de Geologia, Laboratório de Experimentos em Mecânica e Tecnologia de Rochas (LEMETRO),

Av. Athos da Silveira Ramos, 274, bloco J0; sala 04. Ilha do Fundão. 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³ CSIRO - Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. 26 Dick Perry Avenue, Kensington, WA 6151 – Australia.

E-mails: melissa.cristina@petrobras.com.br; emilio@geologia.ufrj.br; flavia.falcao@petrobras.com.br; andersonmoraes@

petrobras.com.br; leigh.kiewiet@csiro.au; shane.kager@csiro.au

Recebido em: 10/09/2015 Aprovado em: 04/03/2016

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2016_2_15_28

Resumo

Resultados de ensaios de mecânica de rochas conduzidos em corpos de prova de travertino foram utilizados para a modelagem do comportamento tensão-deformação desta rocha sob condições confinadas e não confinadas, para posterior simulação numérica do comportamento geomecânico da rocha intacta circundante às zonas de falha em um estudo do potencial de reativação de falhas em carbonatos. Devido à ocorrência de endurecimento verificada na maioria dos testes optou-se por utilizar modelo Mohr Coulomb não associado variável, a partir de dois conjuntos de parâmetros mecânicos – coesão, ângulo de atrito e dilatação - para cada modelo. Apesar dos prováveis colapsos de poros ocorridos durante os ensaios não serem capturados pelos modelos, foi possível ajustar o comportamento mecânico dominante observado nos testes de laboratório, sem alterações significativas dos parâmetros medidos experimentalmente. A ferramenta utilizada para a modelagem foi o Tectos (PUC-Rio/Tecgraf – Petrobras), que considera estado plano de deformação. Tendo em vista que os ensaios representam um problema axissimétrico, trabalhos futuros avaliarão a representatividade do modelo de estado plano para o caso em estudo, via comparação desta modelagem com a realizada usando outra ferramenta numérica.

Palavras-chave: comportamento tensão-deformação; modelagem numérica; travertinos

Abstract

Results of rock mechanics tests conducted on travertine plugs have been used to model the stress-strain behavior of this rock under confined and unconfined loadings, for future numerical representation of the intact rock surrounding fault zones, within a study about fault reactivation potential in carbonates. Due to the strain hardening tendency verified in most of the experiments results, a specific Mohr Coulomb model was applied, based on two different sets of cohesion, friction angle and dilation values. Although collapse events verified during the tests could not be captured by the modelling, it was possible to fit the dominant mechanical behavior of the rock, without relevant changes on the parameters measured during the experiments. The software used for this purpose was Tectos (PUC-Rio/Tecgraf - Petrobras), which considers plane strain state. As the experiments configure an axissymmetric problem, future works will evaluate the representativity of plane strain model for this material and test conditions, through comparison of the current modelling results with the ones obtained using a different numerical tool.

Keywords: stress-strain behavior; numerical modelling; travertine

1 Introdução

Rochas carbonáticas do tipo Travertino são amplamente utilizadas na construção civil, particularmente na Itália (Amato *et al.*, 2012). Dados sobre resistência à compressão uniaxial são conhecidos (Erdogan & Özvan, 2015; Török & Vásárhelyi, 2010). No entanto, a despeito deste uso, são relativamente escassos os trabalhos que descrevem seu comportamento mecânico em condições de confinamento (Huillca, 2014). Outro ponto relevante é a heterogeneidade da rocha induzida por diferentes tipos de *fabric* (Török & Vásárhelyi, 2010) e principalmente pela presença de vugs em quantidade e distribuição variadas, responsável por dispersões nos resultados de experimentos mecânicos, além de comportamentos anisotrópicos dos pontos de vista mecânico e hidráulico (García-del-Cura *et al.*, 2012).

Neste contexto, resultados de ensaios de mecânica de rochas conduzidos em corpos de prova cilíndricos de travertino foram utilizados para a modelagem do comportamento tensão-deformação desta rocha, sob condições confinadas e não confinadas. Esta calibração é bastante importante e será posteriormente utilizada para a representação numérica do comportamento mecânico da rocha intacta circundante às zonas de falha em seções de afloramento, em um estudo do potencial de reativação de falhas em carbonatos.

2 Material

Foram utilizados no presente estudo quatro corpos de prova de travertino, confeccionados

a partir de dois blocos medindo 50cm de aresta cada, denominados B1 e B2 (Figura 1), que foram adquiridos em pedreira da Itália na região de Acquasanta Terme, Apeninos Central, Itália, no âmbito de um projeto de pesquisa ao qual este artigo se relaciona (Nogueira *et al.*, 2013).

Depósitos de travertino constituem a mais significativa unidade geológica do amplo anticlinal de Acquasanta Terme, chegando a espessuras de dezenas de metros e se estendem por vários quilômetros quadrados, como uma larga placa ao longo do banco direito do rio Tronto (Galdenzi *et al.*, 2010).

Travertinos desta área têm sido estudados por muitos anos. Como resultado, aspectos relacionados a sua gênese, sedimentologia e geologia estrutural são muito bem conhecidos, o que se confirma pela grande quantidade de artigos de elevado nível publicados sobre estudos nestas rochas (*e.g.* Minissale *et al.*, 2004; De Fillippis *et al.*, 2013; Faccenna *et al.*, 2008). Contudo, a despeito da alta aplicabilidade de travertinos para propósitos de engenharia civil, muito empregado na construção de prédios civis e sacros em Roma (Amato *et al.*, 2012), sua resistência à compressão uniaxial é geralmente um dos poucos parâmetros divulgados em artigos, determinada em investigações para avaliação da qualidade e capacidade de suporte destas rochas para seu uso como material de construção.

Um importante complicador à execução de uma campanha de ensaios mecânicos neste tipo de rocha é a presença de *vugs*. A variabilidade de tamanhos e distribuição impõem uma significativa heterogeneidade e anisotropia a esta rocha, que

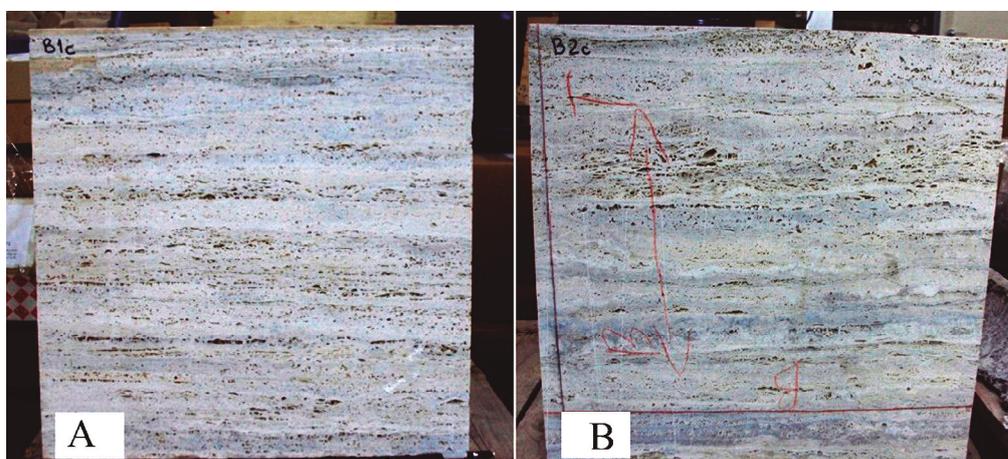


Figura 1

ocorre em diferentes escalas e que pode ser verificada mesmo com uma simples inspeção visual no campo ou em corpos de prova, como pode ser observado na Figura 2. Como consequência direta, a aquisição de corpos de prova semelhantes fica dificultada e, por conseguinte, a comparação dos resultados geomecânicos obtidos a partir destes.



Figura 2 Plugs verticais extraídos do bloco B1. Notar caráter heterogêneo e anisotrópico, muito controlado pela ocorrência de vugs de tamanhos variados.

Neste sentido, a modelagem numérica aparece como ferramenta de auxílio, pela oportunidade que se abre para utilização do modelo numérico em outras condições de contorno que não foram testadas experimentalmente, como diferentes carregamentos.

3 Método

A fim de calibrar o comportamento tensão-deformação de rocha intacta com acamamento perpendicular à direção de carregamento foram construídos modelos em escala de *plug*, baseados nos resultados de ensaios uniaxiais e triaxiais de corpos de prova da matriz da rocha, com eixo principal perpendicular ao acamamento sedimentar (ditos *plugs* verticais), extraídos de B1 e B2 (Tabela 1). Os ensaios aqui tratados foram realizados no CSIRO - Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Austrália), no âmbito de projeto de pesquisa relacionado.

Devido à expressiva quantidade e tamanho dos vugs, foram perdidas amostras ensaiadas em compressão hidrostática, uma vez que as pressões de confinamento intrudiam a membrana para dentro

Modelo	Ensaio
RI_v_B1_0	Plug vertical intacto do B1, confinamento de 0MPa
RI_v_B1_20	Plug vertical intacto do B1, confinamento de 20MPa
RI_v_B2_0	Plug vertical intacto do B2, confinamento de 0MPa
RI_v_B2_20	Plug vertical intacto do B2, confinamento de 20MPa

Tabela 1 Listagem dos modelos e respectivas tensões de confinamento.

dos vugs e estas se rasgavam. Como solução para este problema, para a realização dos ensaios triaxiais utilizou-se uma membrana de 8mm de espessura - significativamente mais espessa que as membranas de 0.3mm comumente utilizadas em testes triaxiais. No entanto, a utilização desta membrana impacta negativamente a acurácia das medidas de deslocamento radial obtidas nos ensaios com estas rochas e, por conseguinte, a obtenção de grandezas derivadas da medição deste deslocamento, como a deformação diametral e a razão de Poisson.

Este problema decorre do fato de que a membrana espessa também se deforma, de modo que os deslocamentos medidos são uma soma dos deslocamentos da rocha e da membrana. Para contornar esta questão, foi feita uma calibração expedita dos deslocamentos da membrana através do carregamento hidrostático de um corpo de prova de aço com a membrana, de onde foram calculados os deslocamentos desta, considerando que as propriedades elásticas do aço são conhecidas e os seus deslocamentos podem ser facilmente determinados. Assim, nos testes com rocha, foi possível descontar, pelo menos grosseiramente, o deslocamento da membrana dos medidos nos testes com membrana e rocha, resultando no deslocamento da rocha.

Ainda como forma de contornar a questão do impacto da membrana sobre os resultados, foram modelados, além de testes triaxiais, ensaios de compressão uniaxial, também conhecidos como testes UCS (*Unconfined Compressive Strength*), para os quais não se utiliza tal membrana. E as simulações numéricas só foram consideradas adequadas quando responderam bem ao comportamento da rocha com e sem confinamento lateral, *i.e.*, com e sem membrana.

Será detalhado a seguir o procedimento seguido para a modelagem do comportamento

mecânico do travertino baseado em cada um dos ensaios laboratoriais, no qual, a fim de melhor capturar o comportamento de endurecimento verificado por vezes durante o carregamento das amostras nos experimentos, optou-se por utilizar modelo Mohr Coulomb não associado variável (Owen *et al.*, 1980), utilizando-se dois conjuntos de parâmetros mecânicos – coesão, ângulo de atrito e dilatância - para cada modelo. A ferramenta utilizada para a modelagem numérica 2D foi o Tectos (PUC-Rio/Tecgraf – Petrobras), sistema de análise mecânica de processos em geologia estrutural e geomecânica baseado no método de elementos finitos, com formulações que consideram estado plano de deformação (Lajes *et al.*, 1996; Moraes *et al.*, 2002).

3.1 Geração da Geometria dos Modelos

A geometria dos modelos foi baseada nas dimensões reais dos *plugs* utilizados nos ensaios, que mediam aproximadamente 38 mm de diâmetro, e entre 71 e 82 mm de altura. Às regiões definidas pelas linhas externas do modelo foram atribuídas propriedades mecânicas e elásticas de rocha intacta, oriundas dos respectivos ensaios. Como durante a execução dos ensaios a instrumentação para medição e controle de deformações radiais localiza-se na região central do *plug*, como forma de se evitar os efeitos de borda gerados pelo atrito entre o corpo de prova e o *cap* de aço, optou-se por privilegiar os resultados obtidos para esta região, utilizando-os, preferencialmente, para análise dos resultados numéricos e comparação com os de laboratório. Para tanto, na parte central de cada modelo foi criada uma nova região, à qual se atribuiu propriedades de materiais idênticas à da região original, mas nomeada distintamente, para possibilitar sua identificação e eventual filtragem durante o processo de exportação dos resultados.

3.2 Geração da Malha e Definição das Condições de Contorno do Modelo

Uma vez definida a geometria, procedeu-se a geração da malha de cada modelo. No Tectos optou-se por dividir uniformemente as arestas externas, utilizando-se segmentos com as seguintes dimensões aproximadas: i) 2,0mm para topo e base e ii) 2,15mm para as laterais. As malhas foram construídas por triangulação.

Por se tratar de modelos que representam ensaios triaxiais em rochas, materiais que se deformam, os contornos de cada modelo foram mantidos livres para se deslocar, sem restrições de movimento. Em toda a extensão da base foram impedidos os movimentos verticais pela introdução de apoios de 1º tipo, que permitem apenas deslocamentos horizontais, mas adicionalmente foram também impedidos deslocamentos horizontais no ponto médio da base, colocando-se ali um apoio de 2º tipo, a fim de oferecer estabilidade ao modelo. A Figura 3 ilustra a forma básica dos modelos, com as regiões definidas, a malha, os suportes e o carregamento externo.

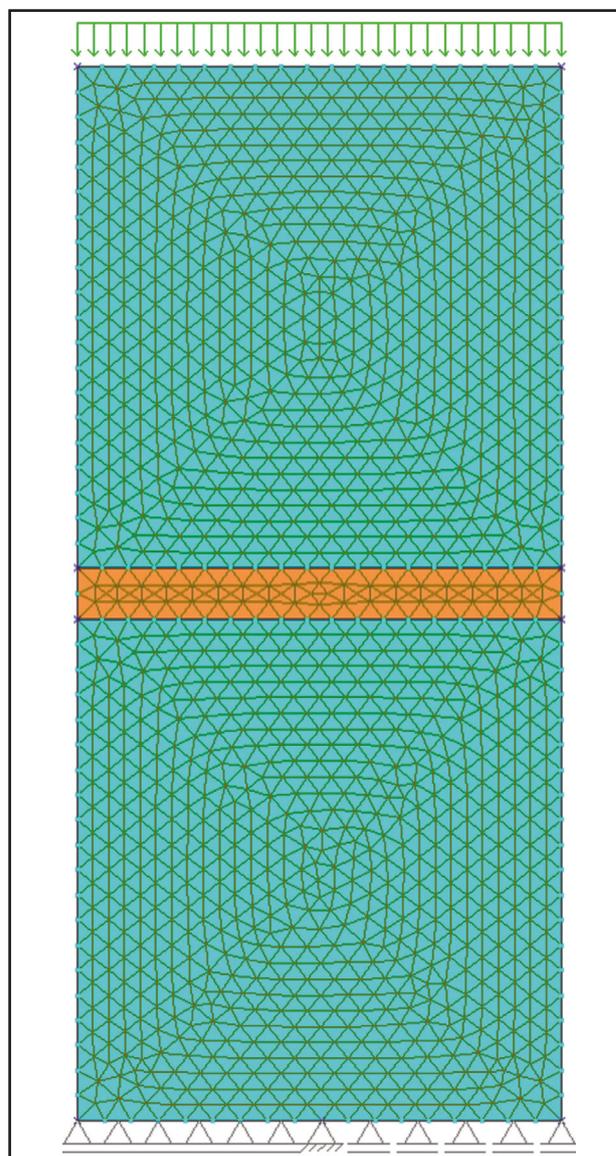


Figura 3 Modelo RI v B1_0. Em laranja, região central construída para facilitar a exportação de resultados e comparação com os ensaios laboratoriais.

3.3 Atribuição de Propriedades dos Materiais

Na Tabela 2 são detalhadas as características gerais dos *plugs* verticais utilizados para a modelagem de calibração. Os dados das propriedades petrofísicas apresentados na referida tabela foram obtidos experimentalmente com a injeção de gás hélio nos mesmos corpos de prova que foram submetidos aos ensaios geomecânicos, ou em corpos de prova oriundos do mesmo bloco.

3.4 Aplicação dos Carregamentos Hidrostático e Desviador

Para a simulação dos carregamentos hidrostáticos e desviadores aplicados durante cada um dos ensaios triaxiais de compressão modelados, cada ensaio foi representado por dois modelos, da seguinte forma: i) modelo inicial: onde foi inicialmente simulada a imposição dos carregamentos hidrostáticos, através da aplicação de cargas uniformemente distribuídas nas laterais e no topo de cada modelo referente à tensão confinante efetiva do respectivo ensaio; ii) modelo cumulativo: modelo subsequente, construído com base nas tensões e deformações acumuladas no modelo inicial, ao qual foram aplicados apenas os carregamentos equivalentes às tensões axiais diferenciais efetivas dos respectivos ensaios. No caso dos ensaios uniaxiais, como não há confinamento,

o carregamento é feito em um único estágio, com aplicação direta da tensão axial diferencial, não havendo necessidade de se gerar modelo cumulativo. A Tabela 3 traz os valores de tensão confinante, pressão de poros e tensão diferencial máxima utilizados para os ensaios modelados.

Para simular o carregamento da tensão confinante definiu-se na interface do programa uma quantidade constante de passos de carga (ou *Load Steps*) para todos os modelos, 100 passos, e um valor (passo) também constante de 0,01, resultando em uma sequência de *Load Steps* como a seguinte: 0 – 0,01 – 0,02 – 0,03 - ... – 0,99 – 1,00. Desta forma, as tensões confinantes foram aplicadas progressivamente de 0 (que equivale a 0% do valor da tensão máxima) até 1 (100% do valor da tensão máxima). O mesmo procedimento foi utilizado nos modelos para aplicação das tensões diferenciais.

3.5 Exportação dos Resultados

Os resultados obtidos para tensões e deformações para cada *Load Step* foram exportados do Tectos com auxílio de um programa executável para leitura dos arquivos “*.pos*” gerado pelo programa após a conclusão da análise numérica (Cambier, 2014). Nesta interface, é possível: i) a exportação dos resultados para todos ou para um

Modelo	Altura [m]	Diâmetro [m]	Massa Específica Seca [kg/m ³]	Porosidade [%]	Permeabilidade	
					[m ²]	[mD]
RI_v_B1_0	0,08244	0,03767	2,340x10 ³	6,67 ^(*)	1,445x10 ⁻¹⁷ ^(*)	1,445x10 ⁻² ^(*)
RI_v_B1_20	0,07884	0,03768	2,360 x10 ³	7,83	2,613x10 ⁻¹⁷	2,613x10 ⁻²
RI_v_B2_0	0,07142	0,03766	2,420 x10 ³	7,86	4,500x10 ⁻¹⁷	4,500x10 ⁻²
RI_v_B2_20	0,07828	0,03764	2,440 x10 ³	6,84	1,033x10 ⁻¹⁷	1,033x10 ⁻²

Tabela 2 Características gerais dos plugs.

(*) Por falta de medição petrofísica por injeção de hélio para este plug, assumiu-se no modelo RI_v_B1_0 a porosidade determinada pela saturação do plug em água, e permeabilidade igual ao valor médio considerando todos os outros plugs verticais oriundos do B1.

Modelo	Tensão Confinante [MPa]	Pressão de Poros [MPa]	Tensão Diferencial Máxima [MPa]	
			Ensaio	Modelo
RI_v_B1_0	0	0	24,0	30,0
RI_v_B1_20	20,0	0	75,0	80,0
RI_v_B2_0	0	0	20,6	21,0
RI_v_B2_20	20,0	0	82,0	85,0

Tabela 3 Valores de tensão confinante, pressão de poros e tensões diferenciais máximas utilizados nos modelos.

Bloco	Ponto	Tensão Diferencial [MPa]		
		$\sigma_c \sigma_c = 0\text{MPa}$	$\sigma_c \sigma_c = 10\text{MPa}$	$\sigma_c \sigma_c = 20\text{MPa}$
1	A	24,00	31,20	37,98
	B	24,00	41,73	60,60
	C	24,00	42,41	65,72
	D	24,00	43,09	70,86
	E	24,00	44,04	75,05
2	A	12,60	42,40	62,10
	B(*)	18,60	49,10	74,20
	C	20,60	49,10	74,20
	D	20,60	62,50	82,00

Tabela 4 Pontos de ruptura ou colapso observados nos dados experimentais dos plugs.

Legenda: (*) apenas um ponto de inflexão: colapso não observado; $\sigma_c \sigma_c$ = tensão confinante.

ou mais materiais do modelo; ii) a escolha de quais resultados devem ser exportados e; iii) os formatos de exportação, que podem ser em (a) arquivo contendo todos os resultados de todos os elementos de interesse, associados aos materiais selecionados, separados por material e por tipo de resultado, ou (b) arquivo contendo um valor médio dos resultados de todos os elementos selecionados, organizados por material. Para o presente estudo, optou-se pela segunda opção.

3.6 Análise dos Resultados

Após exportados os resultados de todos os modelos, foram construídos gráficos dos resultados de tensão diferencial contra os de deformação axial e de deformação volumétrica contra deformação axial, ambos para a parte central do modelo. Os resultados numéricos são apresentados juntamente com os resultados experimentais para avaliação da qualidade do dado numérico em representar adequadamente o comportamento tensão-deformação real da rocha (assumindo este como sendo o dos ensaios).

4 Resultados

A Figura 4 traz as curvas de tensão axial diferencial vs. deformação axial obtidas nos ensaios dos *plugs* de travertino com acamamento horizontal extraídos de B1 e B2. Nela podem ser

observadas pequenas quedas na tensão diferencial que ocorrem a tensões axiais diferenciais menores que a da ruptura final de cada amostra, associadas a aumento da deformação, e com recuperação do incremento da tensão diferencial logo em seguida. O comportamento destes colapsos foi estudado em conjunto, via correlação entre os níveis de tensão em que ocorreram nos diferentes ensaios. A Tabela 4 traz a listagem destes pontos de colapso inicial e/ou intermediário e, ainda, os pontos de ruptura finais, estes últimos associados à tensão axial diferencial máxima do ensaio.

Assim, considerando todos estes pontos de colapso e rupturas, foram determinadas diferentes envoltórias de resistência, a saber: i) associadas ao início do escoamento; ii) associadas a valores intermediários de tensão axial e/ou associadas ao pico da tensão axial.

Com estas envoltórias, foram obtidos parâmetros de resistência para as rupturas (ou colapsos) iniciais e intermediárias e/ou finais. Isto viabilizou a obtenção de modelos que representassem melhor o comportamento tensão-deformação da rocha, uma vez que, de posse de pelo menos dois conjuntos de parâmetros de resistência para cada ensaio - um para representar o colapso inicial e outro para representar a ruptura final -, foi possível aplicar o modelo Mohr Coulomb não associado variável para cada um dos ensaios modelados.

A Tabela 5 e a Tabela 6 trazem uma síntese dos parâmetros elásticos e de resistência baseados nas curvas de ensaio. E a Tabela 7, os valores de fato utilizados na modelagem de calibração do comportamento tensão-deformação destes plugs. Nesta última, a medida Ks_{lab} é a rigidez do grão de acordo com o dado experimental, sendo dada pela equação:

$$Ks_{lab} = \frac{Kr_{lab} \cdot Kw \cdot (1 - \phi)}{(Kw - \phi \cdot Kr_{lab})} \quad (1)$$

onde: Kw é a rigidez da água, ϕ é a porosidade da amostra e Kr_{lab} é a rigidez da rocha calculada com o Módulo de Young E e a razão de Poisson ν , determinados experimentalmente, pela equação:

$$Kr_{lab} = \frac{E}{3 \cdot (1 - (2 \cdot \nu))} \quad (2)$$

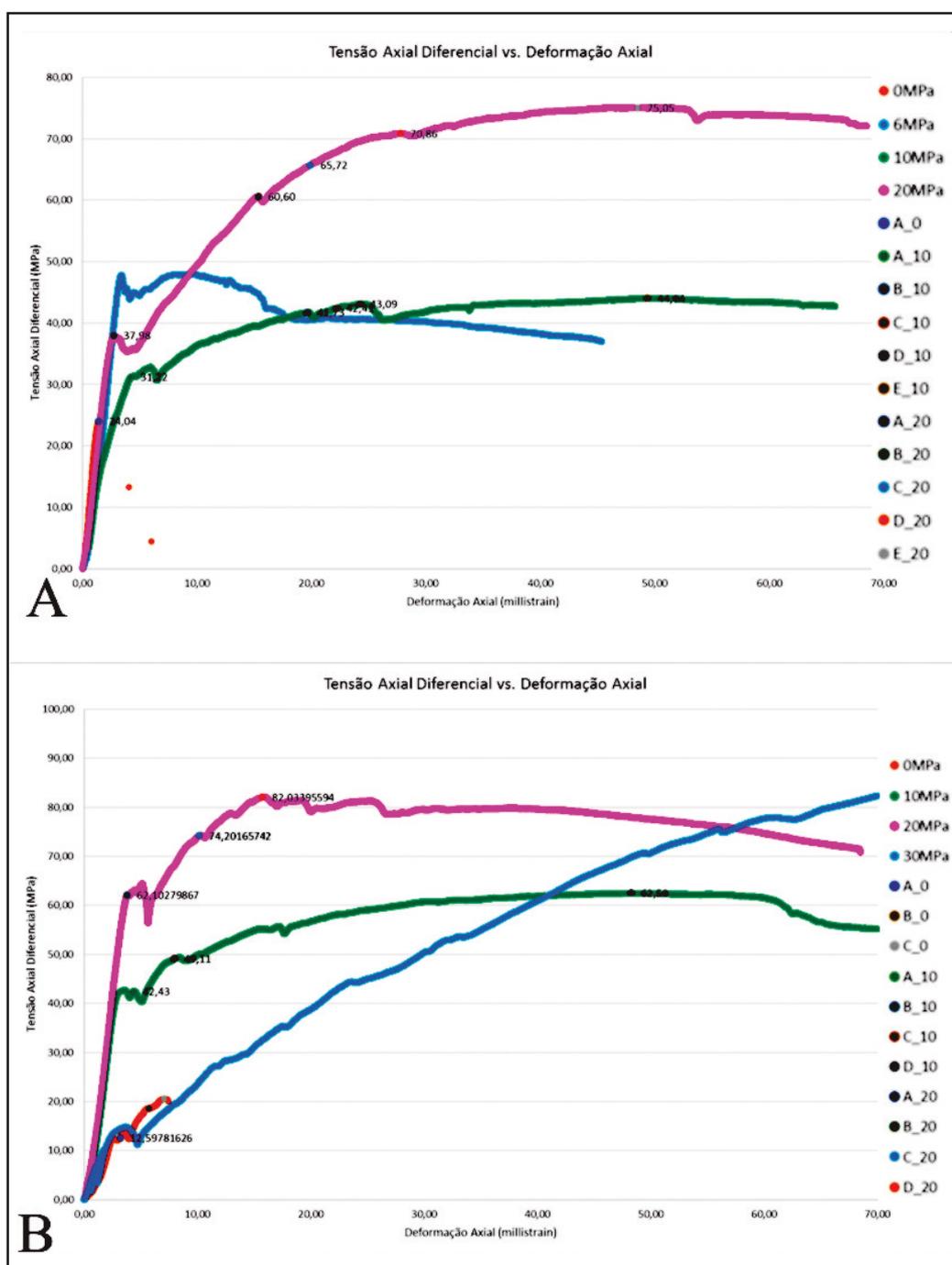


Figura 4 Curvas tensão axial diferencial vs. deformação axial de plugs de travertino verticais (plugs com acamamento horizontal) extraídos dos blocos B1 (A) e B2 (B). Observar posições aproximadas de pontos de ruptura e colapsos, nomeados de A até E.

Na mesma tabela, a medida “PEQE” é uma medida da deformação plástica equivalente sofrida pela amostra até determinado nível de carregamento. Na prática, ela representa o ponto a partir do qual foram atribuídos os novos valores para coesão, ângulo de atrito e/ou dilatância nos modelos, na utilização de modelo Mohr Coulomb não associado variável. A medida PEQE pode ser determinada pela equação:

$$PEQE = \sqrt{\left(\frac{2}{3} \cdot e_{ij}^p \cdot e_{ij}^p\right)} \quad (3)$$

Modelos	Módulo de Young [GPa]	Razão de Poisson [adim.]	Dilatância [graus]
RI_v_B1_0	21,9	0,19	56,5
RI_v_B1_20	16,9	0,3	21,48
RI_v_B2_0	7,3	(*)	34,07
RI_v_B2_20	21,2	0,24	18,86

Tabela 5 Módulo de Young, razão de Poisson e dilatância com base nos pontos de ruptura finais (tensão diferencial máxima) observados nos dados experimentais.

(*) Ausência de dado experimental adequado.

onde e_{ij}^p, e_{ij}^p representa as deformações plásticas desviadoras. Esta medida é calculada por: (4)

$$e_{ij}^p = \varepsilon_{ij}^p - \frac{1}{3} \cdot \delta_{ij} \cdot \varepsilon_v^p$$

sendo $\varepsilon_{ij}^p, \varepsilon_{ij}^p$ e $\varepsilon_v^p, \varepsilon_v^p$ as deformações plásticas e volumétrica, respectivamente, e δ_{ij} o delta de Kronecker.

Bloco	Ponto	Usando σ_c, σ_c de 0MPa, 10MPa e 20MPa		Usando σ_c, σ_c de 0MPa e 20MPa	
		Coesão [MPa]	Atrito [graus]	Coesão [MPa]	Atrito [graus]
B1	A	9,23	15,00	9,21	15,00
	B	7,08	28,50	7,13	28,50
	C	6,62	30,60	-	-
	D	6,17	32,60	6,56	32,60
	E	5,88	34,10	6,37	34,10
B2	A	3,83	33,60	3,38	33,60
	B(*)	5,01	35,60	4,78	35,60
	C	5,52	34,90	5,37	34,90
	D	6,03	37,30	5,11	37,30

Tabela 6 Parâmetros de resistência calculados para os pontos de ruptura ou colapso observados.

Legenda: (*) apenas um ponto de inflexão; colapso não observado; σ_c, σ_c = tensão confinante.

Modelo	Razão de Poisson	Módulo Young	Ks lab	Coesão Inicial	Atrito Inicial	Dilatância Inicial	PEQE	Coesão Final	Atrito Final	Dilatância Final
	[adim.]	[GPa]	[GPa]	[MPa]	[graus]	[graus]	[adim.]	[MPa]	[graus]	[graus]
RI_v_B1_0_m1	0,19	21,00	15,80	9,233	15,0	0,0	0,002	7,077	28,5	56,0
RI_v_B1_0_m2	0,19	21,00	15,80	9,233	15,0	0,0	0,001	6,167	32,6	56,0
RI_v_B1_0_m3	0,19	21,00	15,80	9,233	15,0	0,0	0,001	6,620	31,0	56,0
RI_v_B1_0_m4	0,19	21,00	15,80	9,233	15,0	0,0	0,001	7,510	33,3	56,0
RI_v_B1_20_m1	0,30	16,00	22,90	9,233	15,0	24,0	0,023	7,077	28,5	24,0
RI_v_B1_20_m2	0,30	16,00	22,90	9,233	15,0	24,0	0,045	6,167	32,0	24,0
RI_v_B1_20_m3	0,30	16,00	22,90	9,233	15,0	24,0	0,035	6,620	31,0	24,0
RI_v_B2_0_m1	0,10	7,50	3,23	3,831	33,6	35,0	0,009	5,015	35,6	35,0
RI_v_B2_0_m2	0,10	7,50	3,23	3,831	33,6	35,0	0,009	5,520	34,9	35,0
RI_v_B2_0_m3	0,10	7,50	3,23	3,831	33,6	35,0	0,009	6,030	37,3	35,0
RI_v_B2_0_m4	0,10	7,50	3,23	3,380	33,6	35,0	0,006	4,783	35,0	35,0
RI_v_B2_0_m5	0,10	7,50	3,23	3,380	33,6	35,0	0,010	5,300	34,9	35,0
RI_v_B2_0_m6	0,10	7,50	3,23	3,380	33,6	35,0	0,009	5,000	37,3	35,0
RI_v_B2_20_m1	0,24	19,00	18,00	3,831	33,6	0,0	0,010	5,015	35,6	20,0
RI_v_B2_20_m2	0,24	19,00	18,00	3,831	33,6	10,0	0,020	5,520	34,9	20,0
RI_v_B2_20_m3	0,24	19,00	18,00	3,831	33,6	10,0	0,010	6,030	37,3	20,0
RI_v_B2_20_m4	0,24	19,00	18,00	3,380	33,6	10,0	0,021	4,783	35,0	20,0
RI_v_B2_20_m5	0,24	19,00	18,00	3,380	33,6	10,0	0,021	5,300	34,9	20,0
RI_v_B2_20_m6	0,24	19,00	18,00	3,380	33,6	10,0	0,018	5,000	37,3	20,0

Tabela 7 Coesão, ângulo de atrito, dilatância e outros parâmetros considerados nos modelos de calibração.

Na Figura 5 até a Figura 8 são expostas, juntamente com as curvas obtidas com os dados experimentais de cada ensaio, as curvas de tensão axial diferencial contra deformação axial e de deformação volumétrica contra deformação axial obtidas com os modelos. Destaca-se que, sempre

que necessário, as curvas dos modelos sofreram uma translação no eixo da deformação axial, deslocando seu ponto inicial para considerar a deformação inicial não linear, provavelmente associada a fechamento de microfissuras, sofrida pelas amostras e não capturada pelos modelos.

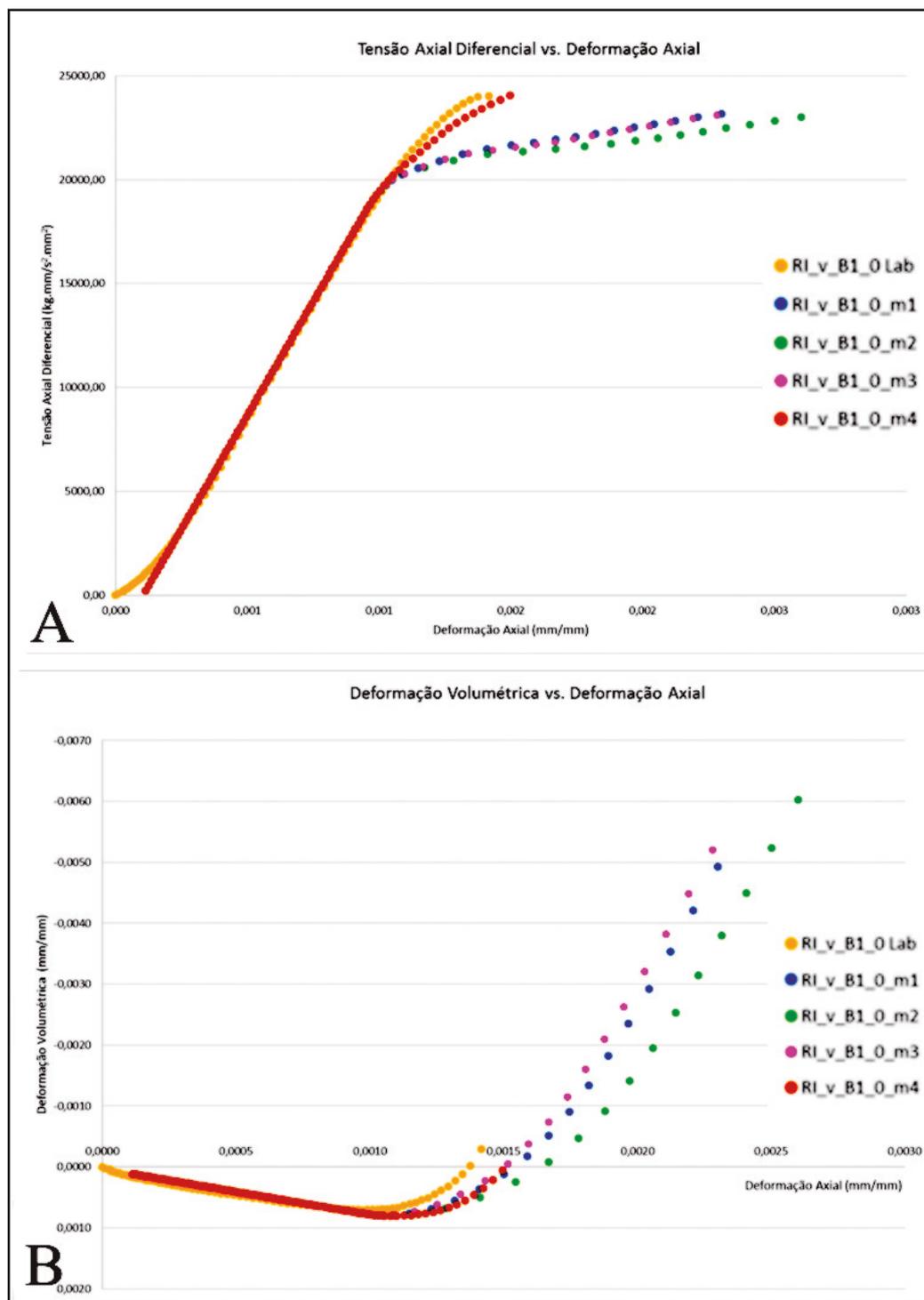


Figura 5 Curvas de tensão axial diferencial vs. deformação axial (A) e de deformação volumétrica vs. deformação axial (B) obtidas com os modelos do ensaio RI_v_B1_0 (ensaio UCS). Em amarelo a curva com os dados experimentais, para comparação.

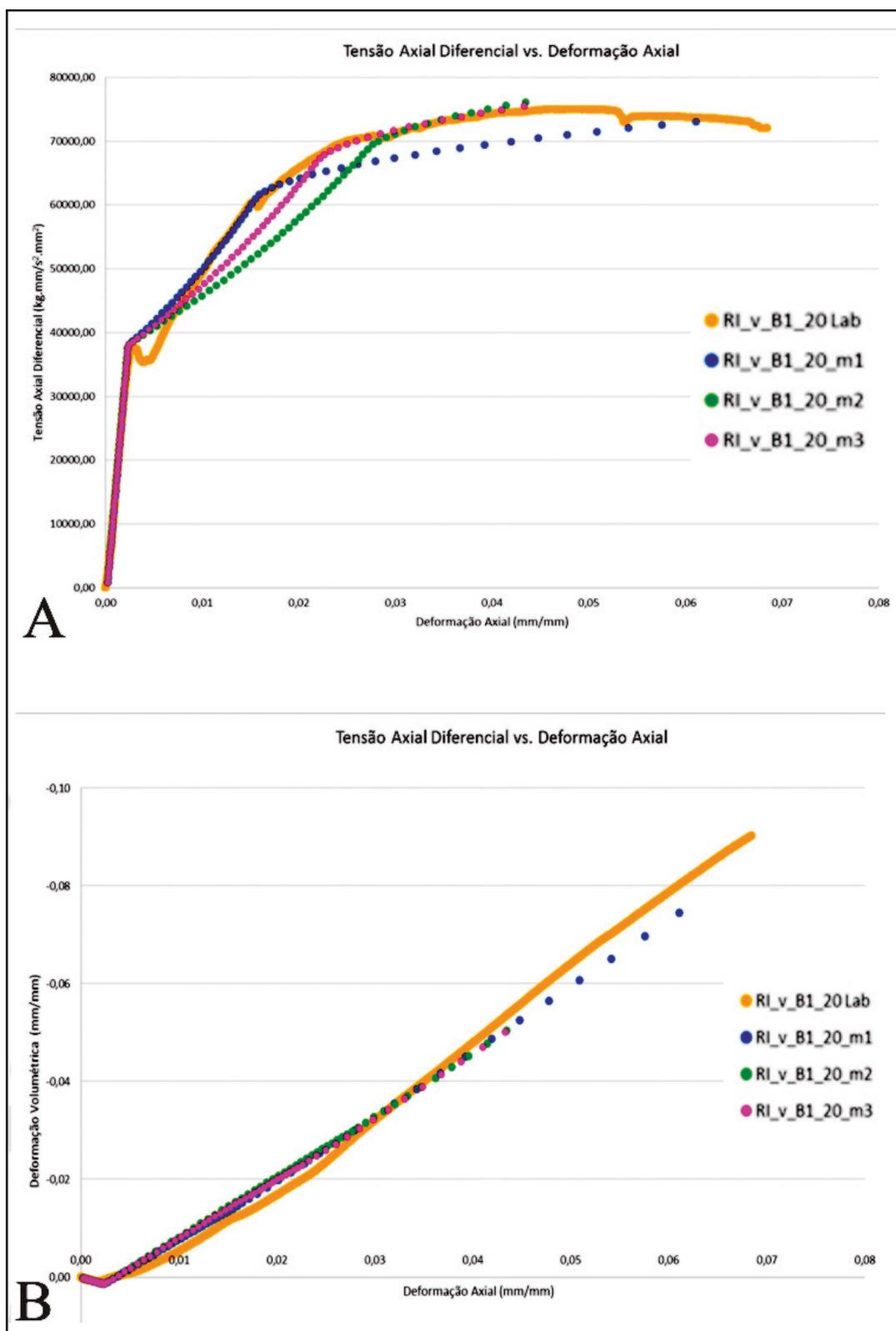


Figura 6 Curvas de tensão axial diferencial vs. deformação axial (A) e de deformação volumétrica vs. deformação axial (B) obtidas com os modelos do ensaio RI_v_B1_20 (ensaio triaxial). Em amarelo a curva com os dados experimentais, para comparação.

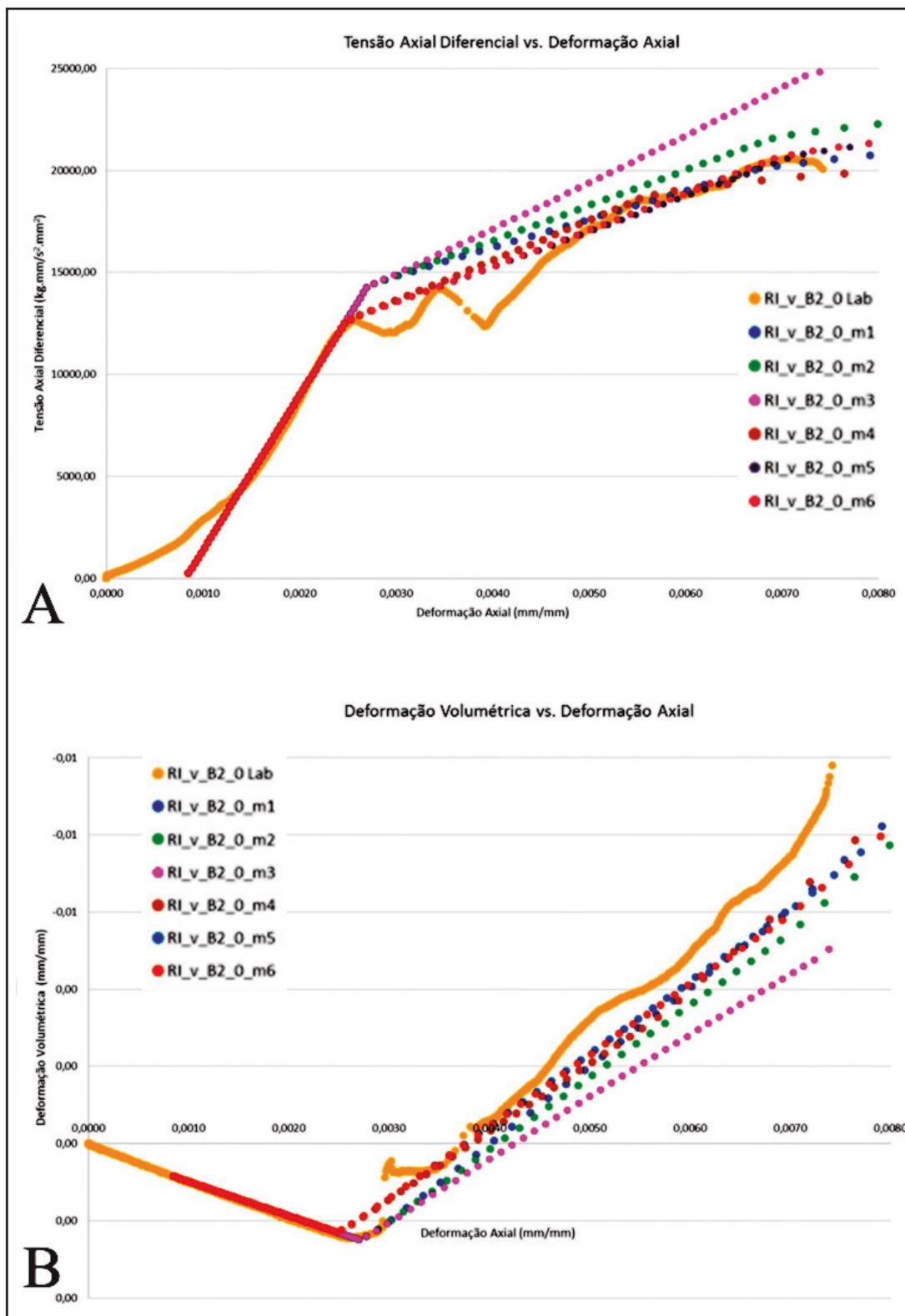


Figura 7 Curvas de tensão axial diferencial vs. deformação axial (A) e de deformação volumétrica vs. deformação axial (B) obtidas com os modelos do ensaio RI_v_B2_0 (ensaio UCS). Em amarelo a curva com os dados experimentais, para comparação.

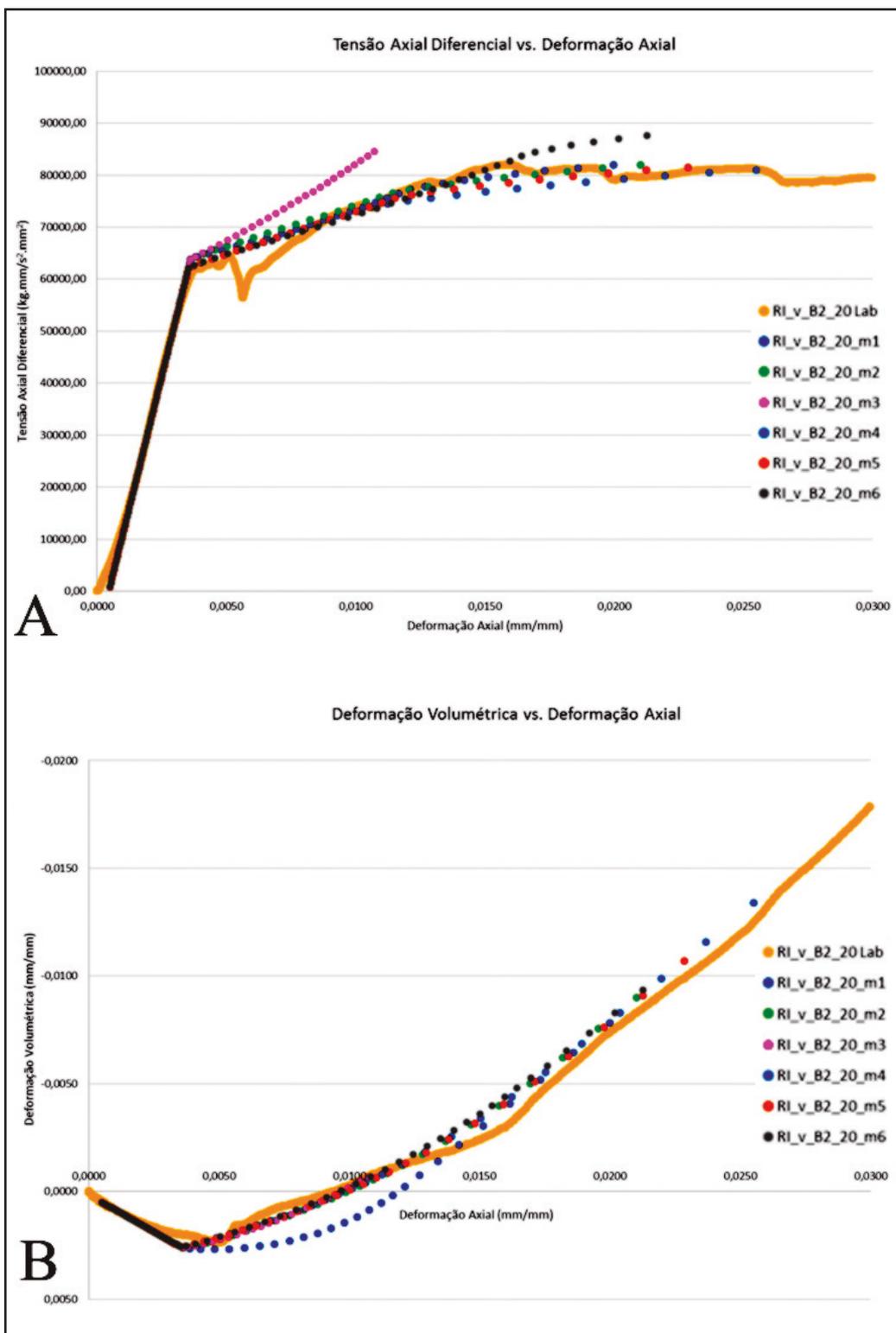


Figura 8 - Curvas de tensão axial diferencial vs. deformação axial (A) e de deformação volumétrica vs. deformação axial (B) das curvas obtidas com os modelos do ensaio RI_v_B2_20 (ensaio triaxial). Em amarelo a curva com os dados experimentais, para comparação.

5 Conclusões

Nenhum dos modelos se ajusta perfeitamente ao comportamento tensão-deformação observado ao longo do carregamento das amostras, como seria o ideal. Eventos de ruptura local, observados na forma de pequenas quedas na tensão diferencial associadas ao aumento da deformação e com recuperação do incremento da tensão diferencial logo em seguida, que foram observados na maioria dos testes (Figura 4), e que podem ser associados a colapsos de poros, não foram capturados pelos modelos. Entretanto, considera-se que os modelos foram, em sua maioria, capazes de representar o trecho inicial de carregamento, e depois deste, representaram até certo ponto a tendência de endurecimento.

Nos modelos construídos considerando os parâmetros mecânicos oriundos da envoltória de pico dos ensaios foi verificado que, após o trecho inicial de carregamento, a resistência da rocha é superestimada, fornecendo valores de deformação menores do que os verificados no ensaio, e/ou atingindo valores de carregamento axial maiores dos que os de fato suportados pelos materiais, como nos modelos RI_v_B2_0_m1 (Figura 7) e RI_v_B2_20_m3 (Figura 8), por exemplo. Este comportamento é coerente com as condições impostas pelo estado plano de deformação, uma vez que, neste estado, a tensão média é aumentada para anular as deformações na direção perpendicular ao plano modelado.

Em outros modelos, onde se utilizou parâmetros mecânicos ajustados menores do que os determinados pelas envoltórias de pico, essa resistência foi minimizada, fornecendo maiores deformações e menores valores de tensão axial máxima suportada pela rocha, como em RI_v_B2_20_m5 (Figura 8), por exemplo. Nestes modelos, a utilização de parâmetros de resistência mais baixos parece ter compensado o efeito do acréscimo da tensão média imposto pelo estado plano de deformação, de modo que os modelos se ajustam melhor aos resultados experimentais.

Considera-se que modelos como este último fornecem parâmetros mais adequados em casos onde se deseja empregá-los para análise numérica da estabilidade de estruturas em rocha, como no caso da presente pesquisa, visto que não superestimam o potencial da rocha, ficando a favor da segurança. Neste contexto, dentre os modelos

que foram construídos, acredita-se que aqueles que melhor reproduzem o comportamento da rocha com acamamento sedimentar horizontal foram: i) RI_v_B1_0_m4 (Figura 5) e RI_v_B1_20_m3 (Figura 6), para o bloco 1, e ii) RI_v_B2_0_m5 (Figura 7) e RI_v_B2_20_m5 (Figura 8), para o bloco 2.

Para o bloco 1, os modelos mencionados foram construídos com diferentes valores de coesão e atrito finais. E, como o modelo RI_v_B1_0_m4 foi construído com parâmetros que só se ajustam a este modelo, não se ajustando ao modelo com confinamento, decidiu-se por não considerar este modelo, e, ao invés disto considerar o modelo RI_v_B1_0_m3 (Figura 5), construído com os mesmos valores de coesão e ângulo de atrito que o modelo RI_v_B1_20_m3, e que também representa bem o comportamento da rocha, apenas subestimando um pouco mais sua capacidade de suporte em condição não confinada. Para o bloco 2, os dois modelos escolhidos foram construídos com os mesmos valores de coesão e ângulo de atrito, o que indica que este conjunto de parâmetros representa bem situações com e sem confinamento.

Trabalhos futuros avaliarão em detalhe, qualitativa e quantitativamente, a representatividade de modelos de estado plano de deformação para o material e ensaios aqui descritos - que configuram um problema axissimétrico -, via comparação desta modelagem com a que será realizada usando outra ferramenta numérica.

6 Agradecimentos

À Petrobras, como financiadora do projeto relacionado a esta pesquisa, pela autorização para utilização de seus resultados, e também pela liberação da primeira autora para a realização de seu Doutorado na UFRJ. Ao CSIRO, pela execução dos ensaios. À equipe do Tecgraf pelo suporte para a utilização do Tectos. Ao Programa de Pós-graduação em Geologia da UFRJ (PPGL-UFRJ).

7 Referências

- Amato, V.; Anzalone, E.; Aucelli, P.; D'Argenio, B.; Ferreri, V. & Roskopf, C. 2012. Sedimentology and Depositional History of the Travertines Outcropping in the Poseidonia-Paestum Archaeological Area. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 23: 61-68.
- Cambier, P. 2014. Arquivo executável para exportação de

- resultados do Tectos. Tecgraf/PUC-Rio – Petrobras.
- De Filippis, L.; Faccenna, C.; Billi, A.; Anzalone, E.; Brilli, M.; Soligo, M. & Tuccimei, P. 2013. Plateau Versus Fissure Ridge Travertines from Quaternary Geothermal Springs of Italy and Turkey: Interactions and Feedbacks Between Fluid Discharge, Paleoclimate, and Tectonics. *Earth-Science Reviews*, 123: 35-52.
- Erdogan, O. & Özvan, A. 2015. Evaluation of strength parameters and quality assessment of different lithotype levels of Edremit (Van) Travertine (Eastern Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, 106: 108-117.
- Faccenna, C.; Soligo, M.; Billi, A.; De 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. *Global and Planetary Change*, 63(4): 299-308.
- Galdenzi, S.; Cocchioni, F.; Filipponi, G.; Morichetti, L.; Scuri, S.; Selvaggio, R. & Cocchioni, M. 2010. The Sulfidic Thermal Caves of Acquasanta Terme (Central Italy). *Journal of Cave and Karst Studies*, 72(1): 43–58.
- García-del-Cura, M.A.; Benavente, D.; Martínez-Martínez, J. & Cueto, N. 2012. Sedimentary structures and physical properties of travertine and carbonate tufa building stone. *Construction and Building Materials*, 28: 456–467.
- Huillca, C.A.L. 2014. *Estudo Experimental do Comportamento Geomecânico do Travertino*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Dissertação de Mestrado. 149 p.
- Lajes, E.N.; Pelluci, R.; Vargas Junior, E.A.; Conceição, J.C.J. & Moraes, A. 1996. *Tectos (Simulador Avançado de Deformações Geológicas)*, Versão 2.0. Rio de Janeiro: PETROBRAS. CENPES. DIVEX. SEMBA, 1996. 14 f. (CT SEMBA 015/96).
- Minissale, A.; Kerrick, D.; Magro, S.; Murrell, M.; 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. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(2): 709-728.
- Moraes, A.; Conceição, J.C.J.; Campos, J.L.E.; Vargas Jr., E.A. 2002. Tectos - Programa de Modelagem Mecânica em Geologia Estrutural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41, João Pessoa, 2002, *Resumos*, p. 627.
- Nogueira, M. C. D.; Kiewiet, L. H.; Kager, S.; Firms, S.; Giwelli, A.; Raimon, J.; Esteban, L.; Dillinger, A.; Maney, B.; Clennell, B.; Soares, A. C. & Barroso, E.V. 2013. *Rock Mechanics Test Campaign for the Mechanical Characterization of Travertine Rocks from the Region of Central Apennines, Italy*. Project Report: Fault Reactivation Project. Petrobras / CSIRO – Commercial-In-Confidence.
- Owen, D. R. & Hinton, E. 1980. *Finite Elements in Plasticity*. Swansea, U.K., Pineridge Press. 594p.
- Török, Á. & Vászárhelyi, B. The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology*, 115: 237–245.