

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/460

Determinação dos Parâmetros de Estado Crítico e Rigidez de um Rejeito de Mineração

Marcelo Heidemann

Professor adjunto, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Joinville, Brasil; CONSTRUCT-GEO, Universidade do Porto (FEUP), marcelo.heidemann@ufsc.br

António Joaquim Pereira Viana da Fonseca

Professor associado, CONSTRUCT-GEO, Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal, viana@fe.up.pt

Daniela Coelho

Assistente Técnica, CONSTRUCT-GEO, Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal, danielac@fe.up.pt

Antônio Ananias de Mendonça

Doutorando, CONSTRUCT-GEO, Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal, aanias@ufmg.br

RESUMO: Este trabalho apresenta os resultados obtidos na determinação dos parâmetros de estado crítico e de rigidez a baixíssimas deformações de um rejeito de mineração. Trata-se de um material de textura arenosa e não plástico. Foram executados ensaios triaxiais em corpos de prova consolidados, e cisalhados em condição drenada e não-drenada. Um ensaio de compressão isotrópica foi executado em uma câmara dotada de *bender elements*, permitindo medir o módulo cisalhante máximo (G_0) sob tensões confinantes até 800 kPa. O ensaio possibilitou ainda estabelecer uma função de índice de vazios para o material e os coeficientes que quantificam a influência da fábrica e estado de tensões sob a variação de G_0 . Os valores de G_0 medidos variam de 17 a 244 MPa, sendo a função de índice de vazios de Lo Presti (1995) adotada para normalizar os resultados. Ao fim, os resultados são comparados com os reportados na literatura para alguns rejeitos de cobre e ferro.

PALAVRAS-CHAVE: rejeito de mineração, *bender elements*, módulo cisalhante máximo, estado crítico.

ABSTRACT: This work aimed to determine the critical state and small-strain stiffness parameters of a mining tailing, which is a non-plastic sand. Triaxial tests were carried out on consolidated specimens, which were sheared under drained and undrained conditions. One isotropic compression test was carried out in a chamber equipped with *bender elements*, allowing to measure the maximum shear modulus (G_0) under confining stresses up to 800 kPa. The test also made it possible to establish a void ratio function for the material and the coefficients that quantify the fabric and stress state influence on the variation of G_0 . The measured G_0 range from 17 to 244 MPa, with the void ratio function of Lo Presti (1995) being adopted to normalize the results. Finally, results are compared with data from tests on copper and iron tailings already reported in the literature.

KEYWORDS: mining tailing, *bender elements*, maximum shear modulus, critical state.

1 INTRODUÇÃO

Instalações de armazenamento de rejeitos (TSF) são sujeitas a diversos riscos geotécnicos (Jamiolkowski, 2012). Os recentes casos de colapsos de barragens de rejeitos de Fundão e Brumadinho trouxeram enorme impacto econômico, ambiental e social, e se somam a outras recentes rupturas de barragens de rejeitos em todo o mundo, como reportado por Morgenstern et al. (2016). Rico et al. (2008) documentaram 147 casos de rupturas em barragens de rejeitos em todo o mundo, destacando diferentes causas desencadeadoras, como por exemplo, *piping*, galgamentos, liquefação ou combinações. As barragens mais problemáticas foram construídas utilizando o método à montante com inclinações acentuadas.

Dadas as características físicas dos rejeitos de mineração, estes costumam apresentar risco de ruptura devido à liquefação estática ou sísmica. Assim, identificar as propriedades geomecânicas para descrever adequadamente o comportamento dos rejeitos que compõem estas estruturas é etapa fundamental para

satisfazer os requisitos de projeto relacionados à segurança e confiabilidade, e para garantir compatibilidade entre condicionantes ambientais e de viabilidade técnico-econômica (Santamarina et al. (2019).

Devido à complexidade e sensibilidade desses materiais, as abordagens de engenharia para TSF, seja para construção ou desativação, devem ser sustentadas por análises de estabilidade confiáveis baseadas em modelos numéricos poderosos, a partir de análises de tensão-deformação em termos de tensões efetivas, e utilização de parâmetros constitutivos adequados. Esses modelos, como o CASM¹ (Yu, 1998), por exemplo, podem ser baseados na mecânica dos solos dos estados críticos, a qual fornece um quadro robusto para a caracterização de rejeitos (Soares e Viana da Fonseca, 2016). Solos com parâmetro de estado positivo são mais suscetíveis à liquefação, devido à sua tendência de gerar poropressão acumulada sob carregamento estático ou cíclico, o que induz a redução da resistência/rigidez do solo (Reid et al., 2022).

Neste sentido é também importante a determinação do módulo cisalhante máximo ou a baixíssimas deformações (G_0), já que pode (em conjunto com o coeficiente de Poisson) descrever o comportamento elástico do material, como também compor sua função de degradação de rigidez. Esta função é requisito relevante em previsões do comportamento dos solos frente a eventos sísmicos. Adicionalmente, o parâmetro G_0 pode ser empregado em associação aos resultados de ensaios de campo, nomeadamente o CPTU, para estimativas de potencial de liquefação seja por meio de estimativas de parâmetros de estado (Schnaid e Yu, 2007), seja por meio de indicadores de potencial de liquefação dados por medidas normalizadas de resistência (Robertson et al., 1995, Schnaid et al., 2004).

A partir das medidas de G_0 é possível ainda determinar o índice de rigidez do material. Este é dado pela razão entre a rigidez elástica (G_0 reflete a rigidez estrutural, devida à cimentação ou imbricamento entre as partículas) e a resistência máxima (pico), (G_0/q). Este índice está diretamente associado à fragilidade ou sensibilidade do solo e é um indicativo da suscetibilidade à liquefação por fluxo (Viana da Fonseca et al., 2023), vindo a demonstrar alguma aderência com o índice de sensibilidade de Bishop (1967).

Assim, o presente trabalho tem por objetivo definir os parâmetros de estado crítico para um rejeito de mineração, bem como valores de G_0 em função da porosidade de nível de tensão confinante.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

O material ensaiado consiste em um rejeito de mineração, com características semelhantes à de solos residuais, sendo composto majoritariamente por areias (70%) e siltes (20%), os quais conferem ao material natureza não plástica (classificado como SM). A densidade real das partículas (G_s) é da ordem de 3,113.

2.2 Metodologia

Os ensaios descritos foram executados no Laboratório de Geotecnia da Universidade do Porto, em Portugal. Alguns dos procedimentos e detalhes de equipamentos que são aqui descritos não são normatizados, mas são descritos em Viana da Fonseca et al. (2021) e consistem em práticas padronizadas do referido laboratório que resultam em maior confiabilidade e precisão dos dados gerados.

2.2.1 Preparação dos corpos de prova

Para realização do estudo foram considerados os resultados de três corpos de prova - designados CID50, CIU800/ISO e CID200. Os corpos de prova foram moldados por compactação estática (*moist tamping*), sob teor de umidade de 8%. O índice de vazios alvo dos corpos de prova destinados aos ensaios CID50, CIU800 e Isotrópico é da ordem de 1,28, valor que se presume garantir um estado solto para o material. O corpo de prova

¹ O CASM foi desenvolvido por Yu (1998) no âmbito da Mecânica dos Solos do Estado Crítico como um modelo constitutivo versátil capaz de simular o comportamento de argilas e areias, inclusive a liquefação estática, e tem sido empregado com sucesso para analisar as rupturas das barragens de Brumadinho (Arroyo e Gens, 2021) e Merriespruit (Manica et al., 2022). Nestes casos foi implementado como um modelo de solo definido pelo usuário (UDSM) no PLAXIS. Em comparação com a formulação original, esta versão do CASM inclui a dependência do ângulo de Lode, uma equação de potencial plástico alternativa (Arroyo e Gens, 2021) e a possibilidade de usá-la como um modelo independente da taxa de plastificação ou como um modelo elasto-viscoplástico que leva em conta dependência do tempo de carregamento (Manica et al., 2021).

preparado para o ensaio CID200 foi moldado com índice de vazios inicial da ordem de 0,87, e, portanto, mais denso. A moldagem foi realizada diretamente na câmara triaxial, em seis camadas, sendo a membrana mantida ajustada ao diâmetro do corpo de prova por meio de um molde e aplicação de vácuo.

2.2.2 Triaxial isotrópico com medidas de G_0

O ensaio triaxial isotrópico foi executado em uma câmara triaxial dotada de *bender elements* e com o topo e a base conectadas a controladores de pressão e volume independentes, permitindo, além das medidas de variação de volume, a determinação da condutividade hidráulica sob diferentes níveis de confinamento. Os corpos de prova foram inicialmente saturados com gás carbônico, e posteriormente com água, utilizando contrapressão. Considerou-se o corpo de prova saturado quando, através de medidas da velocidade sísmica de compressão (v_p), feitas com *bender elements*.

No ensaio o corpo de prova foi carregado sob tensões confinantes de 10, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, com descargas a 50 kPa ao serem atingidos 200, 400 e 800 kPa. Após cada descarga fez-se a recarga sob os mesmos estágios seguidos no primeiro carregamento. Após a recarga a 800 kPa este corpo de prova foi rompido de forma não-drenada, como descrito posteriormente.

Logo após a montagem do ensaio, durante as etapas de aplicação de contrapressão e em cada etapa de carga, descarga e recarga fez-se a medição da velocidade de propagação de ondas “S” e “P”, usando *bender elements*. As medidas de ondas “P” objetivaram garantir a saturação do corpo de prova e as ondas “S” permitem medir G_0 . Previamente à montagem do ensaio fez-se a calibração dos *bender elements* para compensação dos atrasos de chegada de onda relacionados à própria constituição do conjunto de sensores e dispositivos de medição. A interpretação das medidas foi feita no domínio do tempo, adotando como critério a primeira chegada de onda, conforme descrito por Viana da Fonseca et al. (2009).

2.2.3 Triaxiais CID e CIU

Os ensaios triaxiais conduzidos até a fase de cisalhamento foram executados em câmaras triaxiais dotadas de células de carga submersíveis, pistões guiados e base e topo lubrificadas, conforme descrito por Viana da Fonseca et al. (2023). Os corpos de prova foram inicialmente saturados com CO₂, e posteriormente com água destilada e desaerada, utilizando contrapressão. Considerou-se os corpos de prova saturados quando atingidos valores de parâmetro B iguais ou superiores a 0,98.

Foram executados ensaios drenados em corpos de prova consolidados isotropicamente a 50 e 200 kPa. O ensaio não drenado corresponde ao corpo de prova utilizado no ensaio de compressão isotrópica. A ruptura dos corpos de prova em ambas as condições, drenada e não drenada, se deu a uma velocidade de 0,025 mm/min com p' inicial igual a 800 kPa. Após a ruptura, com as linhas de drenagem do corpo de prova fechadas e a câmara esvaziada e removida, a base da câmara contendo o corpo de prova foi levada ao congelador. Após 12 horas, o mesmo é retirado do congelador e imediatamente pesado ainda dentro da membrana elástica e com os respectivos papeis-filtro do topo e da base, cujos pesos foram descontados para efeitos de cálculos dos resultados. Convém destacar que para o ensaio em câmara dotada de *bender elements* o congelamento não foi usado já que pode danificar os referidos dispositivos. O corpo de prova congelado possibilita uma medida mais precisa do teor de umidade, logo muito precisa do índice de vazios final, dado que o mesmo se encontra perfeitamente saturado no fim do ensaio. Consequentemente, a variação do índice de vazios ao longo do ensaio pode ser contabilizada do final para o início do cisalhamento e consolidação.

3 RESULTADOS

3.1 Compressão Isotrópica

A Figura 1 mostra a variação de índice de vazios ao longo do ensaio de carregamento isotrópico. A linha de compressão isotrópica (ICL) pode ser claramente estabelecida, com inclinação $\lambda_e=0,064$ (considerando o ajuste do coeficiente em logaritmo natural). Os ciclos de descarga convergem para um coeficiente $\kappa=0,006$.

Os módulos de cisalhamento medidos em cada um dos estágios de carga, em que $OCR=1$, do ensaio de compressão isotrópica são mostrados na Figura 2a. Observa-se que há uma tendência de incremento das

velocidades de ondas “s” com o aumento da tensão confinante. Os valores de G_0 medidos variam de 17 a 250 MPa. Comparativamente são mostrados também resultados obtidos em medidas similares feitas por Vergaray et al. (2023) em rejeitos de cobre e de rejeito de ferro (T1, T2, T3 e T4), descritos por Viana da Fonseca et al. (2023). A comparação revela que os valores medidos para o rejeito estudado coincidem com o limite inferior reportado para os de cobre, e com os mais baixos valores descritos para os de ferro. Fica ainda demonstrada a larga faixa de variação de G_0 para os rejeitos de mineração, ainda que oriundos de um mesmo tipo de minério.

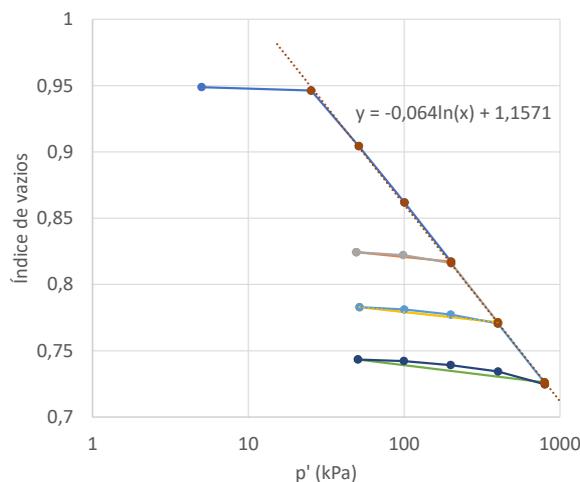


Figura 1. Curva de compressão isotrópica e curvas de descarga e recarga.

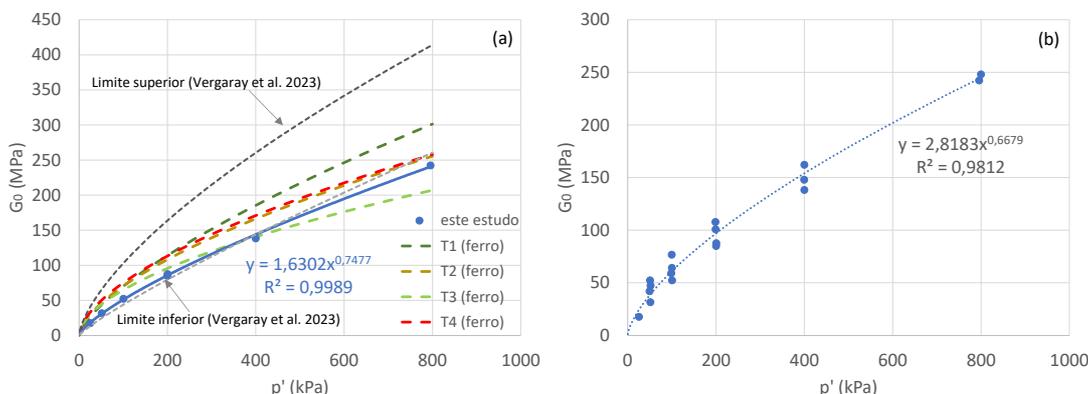


Figura 2. Medidas de G_0 no material ensaiado: (a) sob $OCR=1$ em comparação a resultados obtidos em rejeito de cobre e ferro e, (b) medidas de G_0 sob diferentes valores de OCR .

Como este estudo contemplou ciclos de carga e descarga, tem-se diferentes valores de G_0 medidos para uma mesma tensão confinante como mostrado na Figura 2b, mas sob diferentes índices de vazios. Esta dispersão advém da história de tensões, e, conforme Tatsuoka e Shibuya (1992) e Jamiolkowski et al., (1995), pode ser suprimida se uma apropriada função de índice de vazios for associada aos resultados.

Existem várias propostas para definição da função de índice de vazios, dentre as quais pode-se citar Hardin e Richart (1963), Hardin (1978) e Lo Presti (1995). Conforme descrito por Ferreira et al. (2011), estas funções podem ser diretamente aplicadas quando não se disponha de estudo específico sobre a mais adequada a um dado solo, ou servem como ponto de partida para uma análise mais específica. A proposta de Lo Presti (1995) mostrada na Equação 1 foi tomada como referência nesse estudo, e que para materiais arenosos tem $x=1,3$. É natural que este expoente possa ser distinto em um rejeito SM já que solos com mais finos são mais compressíveis, logo o efeito do índice de vazios é maior.

A Figura 3a mostra o comportamento desta função de índice de vazios e a Figura 3b demonstra o resultado da sua adoção para normalização das medidas de G_0 . O módulo cisalhante normalizado é dado pela Equação 2. Contudo, verificou-se que um ajuste do expoente x poderia reduzir ainda mais a referida dispersão, sendo ideal para o modelo de Lo Presti (1995) neste material $x=2,55$, como mostrado nas Figuras 3a e 3b.

$$f(e) = e^{-x} \quad (1)$$

$$G_0^* = \frac{G_0}{f(e)} \quad (2)$$

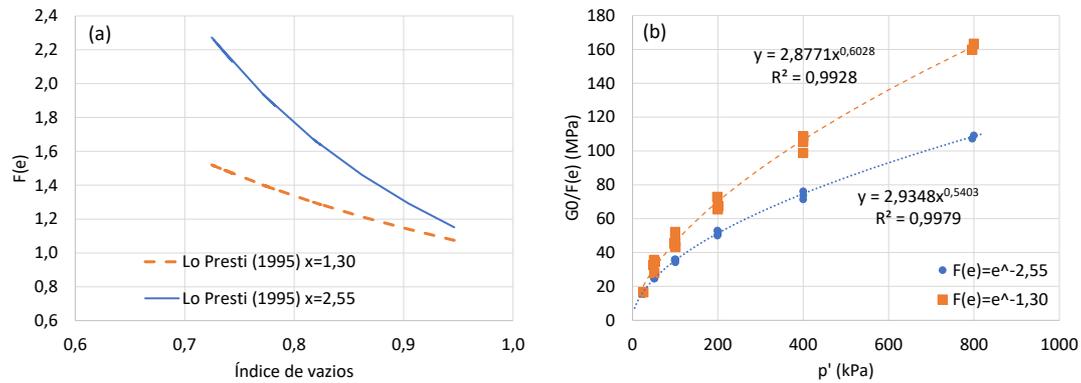


Figura 3. Funções de índice de vazios (a) e módulo cisalhante normalizado (b).

Jamiolkowski et al. (1995) e Nash et al. (2006) postularam que G_0 depende fundamentalmente (i) da estrutura e fábrica, e (ii) estado do solo, descrito por uma combinação entre estado de tensão e índice de vazios, tal qual demonstrado nas Equações 3 (estado anisotrópico) e 4 (estado isotrópico).

$$G_{0ij} = S_{ij} \cdot f(e) \cdot (\sigma'_i)^{n_i} \cdot (\sigma'_j)^{n_j} \quad (3)$$

$$G_{0ij} = S_{ij} \cdot f(e) \cdot p'^n \quad (4)$$

A determinação dos parâmetros “ S_{ij} ” e “ n ” para o material investigado foi feita por regressão linear, de forma que, adotando a função de índice de vazios descrita, G_{0ij} fosse igual a G_0 . Os resultados obtidos são $S_{ij}=3003,37$ e $n=0,536$.

3.2 Ensaios triaxiais CIU e CID

Na Figura 4 são mostradas as curvas de variação de q , volume e poropressão com as deformações axiais dos ensaios executados. Os resultados demonstram a baixa densidade dos corpos de prova para os estados de tensões atingidos. É contrativa a resposta do material ao cisalhamento em condição drenada, com curvas tensão x deformação sem picos de resistência. No ensaio não drenado as poropressões positivas são crescentes até o pico, devido ao elevado índice de rigidez relativa inicial, e posteriormente passa por um processo de amolecimento. Esse incremento de poropressões é baixo enquanto se mobiliza a estrutura interparticular (estável e daí o alto valor de G_0) atingindo valores máximos de resistência no interior do espaço invariante das tensões e bem aquém da CSL. Posteriormente ocorre forte e crescente desestruturação com velocidade crescente de deformações (transitórias - daí o conceito de metaestabilidade), caindo para um valor novamente estável (comportamento newtoniano) em que a resistência é friccional e logo dependente de uma relação de tensões efetivas constante (M). Ensaios de tensão constante demonstram mais claramente esse processo.

A curva do ensaio de cisalhamento não drenado permite definir $s_{u,pico}$ (q_{max} no interior do espaço de tensões antes de mobilizar o estado crítico). No caso de haver instabilidade, esse encontro com a CSL ($s_{u,res}$) será feito a valores muito mais baixos de q . Assim, quanto maior a razão G_0/q_{max} , maior a fragilidade do material, o que corresponde ao já mencionado índice de rigidez do material.

As trajetórias de tensões efetivas são apresentadas também em conjunto com a ICL na Figura 5a. Nesse mesmo espaço define-se linha de estado crítico (CSL) para o material, a qual é paralela à ICL. A tendência contrátil ou de geração de poropressões positivas fica também demonstrada, apontando para corpos de prova sob parâmetro de estado positivo. Na Figura 5b compara-se a CSL do rejeito estudado com alguns oriundos da mineração de Ferro (T1, T2, T3 e T4) descritos por Viana da Fonseca et al. (2022) e Cobre (S1, S2 e S3) apresentados por Vergaray et al. (2023).

Ainda que com rigidez inferior à maior parte dos rejeitos tomados como comparação, o material investigado neste trabalho tem sua CSL associada a índices de vazios bastante inferiores aos dos rejeitos de ferro, e de ordem de grandeza próxima aos de cobre, mostrando-se sujeito à ocorrência de liquefação sob densidades maiores que as dos rejeitos de ferro. Por outro lado, a inclinação da CSL, e por consequência a compressibilidade, é superior à dos demais rejeitos. Logo, o atingimento de estados que produzam comportamento dilatante sob cisalhamento está associado a variações de vazios necessariamente maiores.

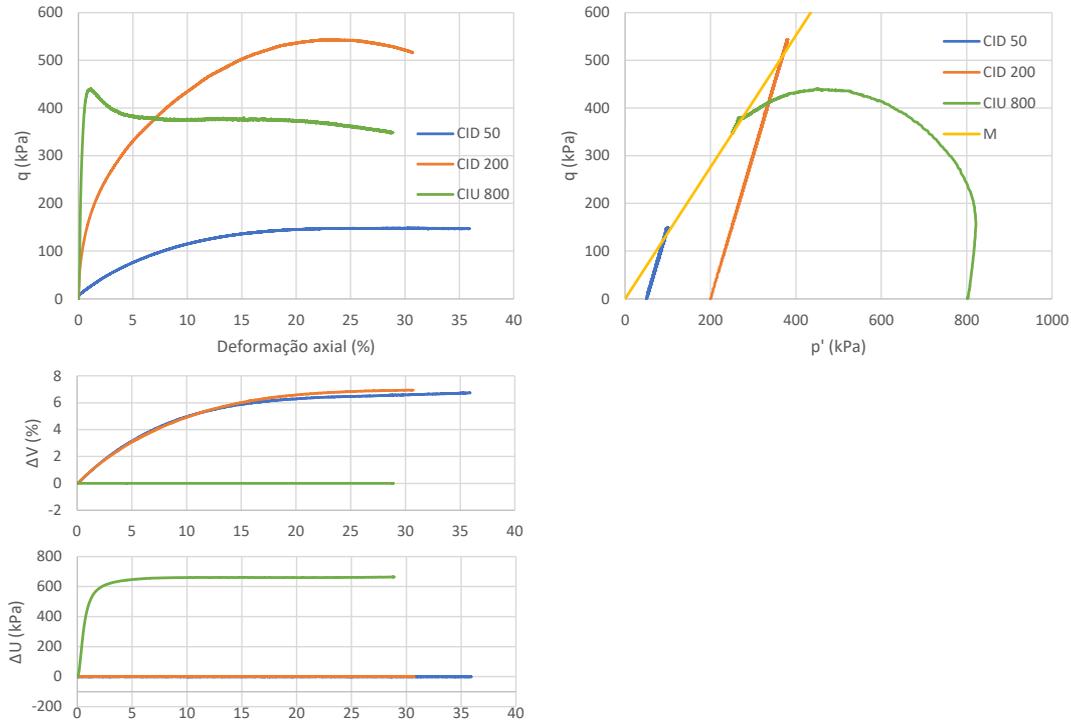


Figura 4. Resultados dos ensaios triaxiais

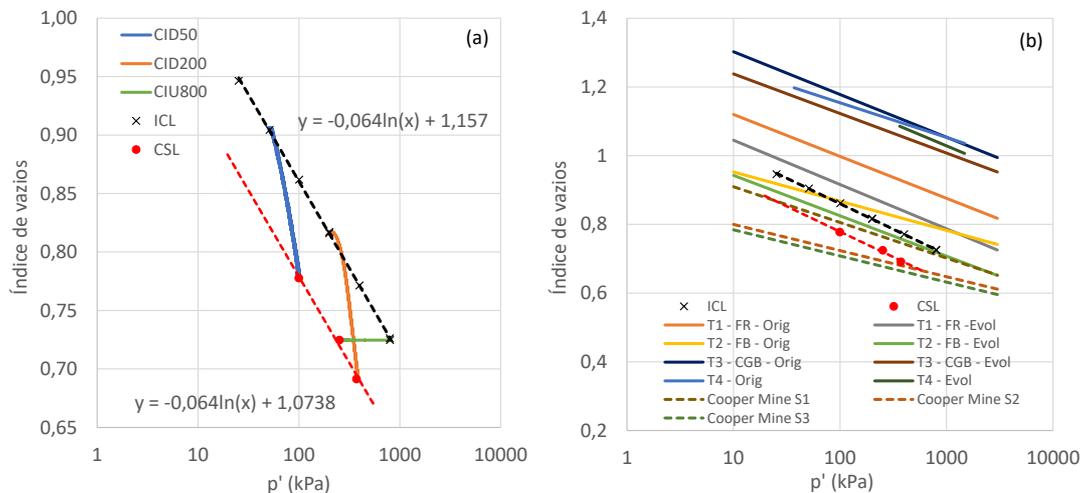


Figura 5. (a) ICL e CSL do material estudado e (b) comparação com as CSL de rejeitos de ferro (T1, T2, T3 e T4) e cobre (S1, S2 e S3).

A Tabela 1 resume os parâmetros de estado crítico em conjunto com os dados oriundos do ensaio de carga/descarga isotrópica, em comparação com os materiais referenciados neste trabalho. Deve-se atentar para o parâmetro λ , que na Tabela 1 se encontra associado ao ajuste da CSL em logaritmo de base natural. Desta tabela é possível constatar também que o rejeito em estudo tem ângulo de atrito de estado crítico (ou M) intermediário ao dos demais rejeitos mencionados, ainda que menos poroso e com rigidez tipicamente inferior.

Tabela 1. Parâmetros de estado crítico do material ensaiado e dos rejeitos tomados para enquadramento

	λ_e *	Γ	κ *	M
Este estudo	0,064	1,07	0,0064	1,38
T1 - FR - Orig	0,053	1,24		1,42
T1 - FR -Evol	0,056	1,17		
T2 - FB - Orig	0,037	1,04		1,40
T2 - FB - Evol	0,051	1,06		
T3 - CGB - Orig	0,054	1,43		1,36
T3 - CGB - Evol	0,050	1,35		
T4 - Orig	0,044	1,35		1,36
T4 - Evol	0,057	1,42		1,36
Cooper Mine S1	0,045	1,01		1,42
Cooper Mine S2	0,088	0,88		1,40
Cooper Mine S3	0,086	0,86		1,36

* obtido de uma função logarítmica natural

4 CONCLUSÕES

O rejeito estudado consiste em uma areia siltosa não plástica. A resposta do material ao cisalhamento em condição drenada é contrativa, com curvas tensão-deformação sem picos de resistência. Em ruptura não-drenada os excessos de poropressão são positivos.

Ensaio triaxiais isotrópicos e CIU permitiram a definição das ICL e CSL, as quais são paralelas entre si. A CSL está associada a índices de vazios bastante inferiores aos de rejeitos de ferro, e de ordem de grandeza próxima aos de cobre, tomados como referenciais para comparação. O rejeito estudado mostra-se sujeito à ocorrência de liquefação sob densidades maiores que as dos rejeitos de ferro. Por outro lado, a inclinação da CSL é superior aos materiais de referência. Assim, o atingimento de estados que produzam comportamento dilatante sob cisalhamento está associado a variações de vazios necessariamente maiores.

Os módulos cisalhantes máximos medidos são da mesma ordem de grandeza do limite inferior medido nos rejeitos de cobre e dos mais baixos medidos em rejeitos de ferro, variando, no intervalo de tensões normais empregado neste estudo, de 17 a 244 MPa.

Por fim, conclui-se que campanhas experimentais, mesmo que em quantidade pequena, mas conduzidas cuidadosamente e com equipamentos calibrados e com apropriada construção são capazes de fornecer uma ampla e confiável gama de parâmetros de comportamento, os quais são fundamentais às análises numéricas que sustentam projetos geotécnicos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado financeiramente por UIDB/04708/2020 e UIDP/04708/2020 do CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construção, financiado por fundos nacionais através do FCT/MCTES (PIDDAC).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arroyo, M., and Gens, A. (2021). Computational analyses of Dam I failure at the Corrego de Feijao mine in Brumadinho. Final report to VALE S.A.
- Bishop, A.W. (1967) Progressive failure - with special reference to the mechanism causing it Proc. Geotech. Conf., Oslo, 2, pp. 142-150
- Ferreira, C., Viana da Fonseca, A., Nash, D.F.T. (2011) Shear wave velocities for sample quality assessment on a residual soil. Soils and Foundations, 51(4). <https://doi.org/10.3208/sandf.51.683>
- Hardin, B.O. (1978) The nature of stress-strain behaviour of soils. Proceedings of the Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, ASCE. Pasadena, California, Vol. 1, pp. 3-39.
- Hardin, B.O., Richart, F.E.Jr. (1963) Elastic wave velocities in granular soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 89, No. 1, pp. 33-65

- Jamiolkowski, M. (2012) Soil mechanics and the observational method: challenges at the Zelazny Most copper tailings disposal facility. *Géotechnique*, 64(8) 590-618. <https://doi.org/10.1680/geot.14.RL.002>
- Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., Lo Presti, D.C.F. (1995) Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays. *Pre-failure Deformation of Geomaterials*. Shibuya, Mitachi & Miura (eds). Balkema, Rotterdam, pp. 817-836.
- Lo Presti, D.C.F. (1995) General report: Measurement of shear deformation of geomaterials in the laboratory. *Pre-failure Deformation of Geomaterials*. Shibuya, Mitachi & Miura (eds). Balkema, Rotterdam, pp. 1067-1088.
- Mánica, M. A., Arroyo, M., Gens, A., and Monforte, L. (2022). Application of a critical state model to the Merriespruit tailings dam failure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 175(2), pp. 151-165. <https://doi.org/10.1680/jgeen.21.00001>
- Mánica, M.A., Arroyo, M. and Gens, A. (2021). Effects of tailings viscosity on liquefaction triggering analyses. In: *Tailings and mine waste '21: proceedings of the twenty-fifth international conference on tailings and mine waste*. pp. 372-381. University of Alberta, Banff, Canada.
- Morgenstern, N.R., Vick, S.G., Viotti, C.B., Watts, B.D. (2016) Fundão tailings dam review panel: Report in the immediate causes of the failure of the Fundão Dam. New York. <http://fundaoinvestigation.com/the-panel-report/>
- Nash, D.F.T., Lings, M.L., Benahmed, N., Sukolrat, J., Wood, M.D. (2006) The effects of controlled destructuring on the small strain shear stiffness Go Bothkennar clay. In *Tatsuoka Geotechnical Symposium*. Rome.
- Reid, D., Dickinson, S., Mital, U., Fanni, R., Fourie, A. (2022) On some uncertainties related to static liquefaction triggering assessments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1680/JGEEN.21.00054>
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A.R., Díez-Herrero, A., Pereira, H.G. (2008) Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 846–852.
- Robertson, P.K., Fear, C.E. (1995) Liquefaction of sands and its evaluation. 1st Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engng, Tokyo '95, Keynote lecture.
- Santamarina, J.C., Torres-Cruz, L.A., Bachus, R.C. (2019) Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, 364(6440), 526–528. <https://doi.org/10.1126/science.aax1927>
- Schnaid, F., Lehane, B.M. Fahey, M. (2004) In situ test characterisation of unusual geomaterials. *Proc. 2nd Int. Conf. on Site Charact., Milpress, Porto*, 1:49–74.
- Schnaid, F., Yu, H.S. (2007) Interpretation on the seismic cone test in granular soils. *Géotechnique*, 57:265–272.
- Soares, M., Viana da Fonseca, A. (2016) Factors Affecting Steady State Locus in Triaxial Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 39(6), 20150228. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150228>
- Tatsuoka, F., Shibuya, S. (1992) Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests. *Report of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo*, Vol. 37, No. 1, pp. 1-136.
- Vergaray, L., Macedo, J., Arnold, C. (2023) Static and Cyclic Liquefaction of Copper Mine Tailings. 149(5). <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-10661>
- Viana da Fonseca, A., Cordeiro, D., Molina-Gómez, F. (2021) Recommended Procedures to Assess Critical State Locus from Triaxial Tests in Cohesionless Remoulded Samples. *Geotechnics* 1(1), 95-127. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010006>
- Viana da Fonseca, A., Cordeiro, D., Molina-Gómez, F., Besenon, D., Fonseca, A., Ferreira, C. (2022) The mechanics of iron tailings from laboratory tests on reconstituted samples collected in post-mortem Dam I in Brumadinho. *Soils and Rocks* 45(2):e2022001122
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., Fahey, M. (2009) A framework interpreting bender element tests, combining time-domain and frequency domain methods. *Geotechnical Testing Journal*: 32(2), pp. 91-107 (DOI: 10.1520/GTJ100974)
- Viana da Fonseca, A., Molina-Gómez, F., Besenon, D., Coelho, D. (2023) The influence of stress-induced anisotropy in undrained yield and ultimate shear strengths in brittle loose deposited silts. *Proceedings of the 8th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials - IS-PORTO*.
- Yu, H.S. (1998) CASM: a unified state parameter model for clay and sand. *Int. J. for Numerical and Analytical methods in Geomechanics incorporating mechanics of cohesive-frictional materials*. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9853\(199808\)22:8<621::AID-NAG937>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9853(199808)22:8<621::AID-NAG937>3.0.CO;2-8)