

IMPACTE DO MODO DE CORTE CÍCLICO NO COMPORTAMENTO DE AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS DE REJEITADOS DE VOLFRÂMIO

Impact of cyclic shear mode on the behaviour of reconstituted tailings samples

João Pedro Oliveira^a, Luis Araújo Santos^{b,c}, Paulo Coelho^{a,d}

^a Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal.

^b Instituto Politécnico de Coimbra, Portugal.

^c Núcleo de Investigação em Sustentabilidade, Cidades e Inteligência Urbana (SUScita), Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal.

^d Centro de Investigação do Território, Transporte e Ambiente (Citta), Universidade de Coimbra, Portugal.

RESUMO – O efeito do modo de carregamento na resposta de rejeitados de mineração de volfrâmio em condições não drenadas é ainda pouco conhecido. De facto, muitos ensaios são realizados em laboratório com recurso a equipamento triaxial, que não reproduz as ações de corte mobilizadas in situ. O presente trabalho aborda esta questão comparando a resposta não drenada de rejeitados de minério de tungsténio sob ações monotónicas e cíclicas de compressão/extensão e de torção simples impostas numa célula triaxial e num *Hollow Cylinder Apparatus*, respetivamente. Após se apresentarem as especificidades da preparação de amostras de rejeitados pelo método da deposição de lama, comparam-se as respostas no domínio das pequenas e grandes deformações. A influência do tipo e modo de carregamento é significativa na geração de pressões intersticiais, atribuindo-se as diferenças ao efeito da tensão principal intermédia. A influência do fator da tensão principal intermédia é igualmente visível na degradação do módulo de rigidez de corte secante com a deformação.

ABSTRACT – The impact of loading mode on the response of wolfram mine tailings under undrained conditions remains poorly understood. Many laboratory tests use triaxial equipment that cannot replicate the shear actions experienced in situ. This paper tackles this issue by comparing the undrained responses of tungsten mine tailings under monotonic and cyclic compression/extension, as well as simple torsion, applied in a triaxial cell and a *Hollow Cylinder Apparatus*, respectively. It discusses the preparation of tailings samples via the slurry deposition method and compares their responses in both small and large deformation ranges. The type and mode of loading significantly influence pore pressure development, mainly due to the effects of the intermediate principal stress. This intermediate stress also impacts the degradation of the secant stiffness modulus with strain.

Palavras-chave – rejeitados da mineração de volfrâmio, *Hollow Cylinder Apparatus* (HCA), modo de corte, módulo de rigidez de corte.

Keywords – wolfram mine tailings, *Hollow Cylinder Apparatus* (HCA), shear mode, shear stiffness

E-mails: joaopsvo@uc.pt (J. Oliveira), lmsantos@isec.pt (L. Santos), pac@dec.uc.pt (P. Coelho)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0825-1651> (J. Oliveira), <https://orcid.org/0000-0001-6078-0393> (L. Santos), <https://orcid.org/0000-0002-0945-3175> (P. Coelho)

1 – INTRODUÇÃO

O objetivo de criar uma sociedade sustentável com a implementação de medidas que promovam o desenvolvimento de tecnologias renováveis, os investimentos em projetos sustentáveis e a aplicação de modelos de economia circular, implicará inevitavelmente o consumo de mais minerais e metais. Segundo os dados apresentados por USAID (2021), onde são apresentados dois cenários possíveis, o consumo de minerais e metais até 2040 deverá ascender a duas até quatro vezes mais do que aqueles que são consumidos atualmente. Além disso, a indústria mineira produz enormes volumes de rejeitados provenientes da sua atividade. Com o aumento expectável da exploração mineira, para fazer face à necessidade da produção de mais minerais e metais, estes volumes de rejeitados irão necessariamente aumentar. Estes rejeitados são normalmente depositados em estruturas de armazenamento de rejeitados, cuja gestão envolve desafios complexos. Em caso de rotura de uma barragem de rejeitados, poderão ocorrer enormes desastres ambientais e sociais. A Figura 1 apresenta as principais causas de falhas de barragens de rejeitados em todo o mundo, onde se observa que, para além do número relativamente reduzido de roturas na Europa, de entre as causas conhecidas, os fenómenos de liquefação sísmica surgem na segunda posição.

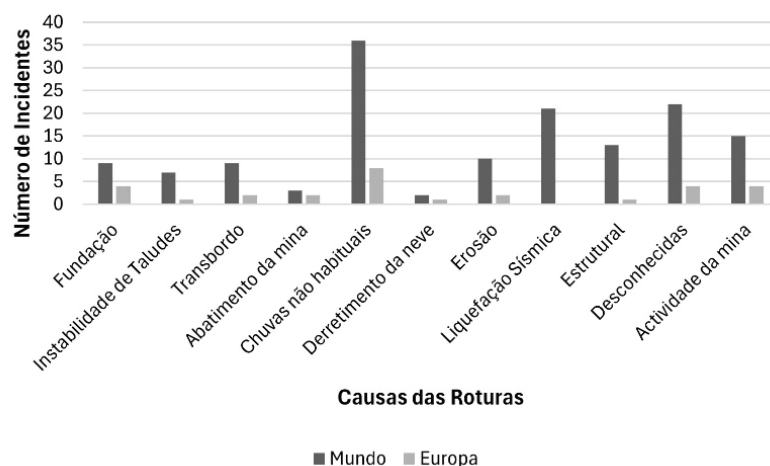


Fig. 1 – Distribuição do número de incidentes em barragens de rejeitados de acordo com a causa no mundo e na Europa (adaptado de Rico et al., 2007).

Os ensaios laboratoriais são uma forma de estabelecer o comportamento dos rejeitados sob ações cíclicas, que podem fornecer uma base para revelar o mecanismo de instabilidade sísmica das barragens de rejeitados. Uma vez que o período de construção de uma barragem de rejeitados se pode prolongar por dezenas de anos e a sua vida útil será muito superior, a sua exposição a ações sísmicas é muito significativa, mesmo em regiões com atividade sísmica pouco frequente. A avaliação dos efeitos dos sismos em barragens de rejeitados é complexa, até porque as alterações na natureza dos rejeitos causadas pelo sismo anterior afetam o seu desempenho em sismos subsequentes. Por exemplo, a barragem de rejeitados de Kayakari, em Kayakari, no Japão, não sofreu danos no grande sismo de 2003, mas, num pequeno sismo subsequente, em 2011, a barragem rompeu por liquefação (Wang et al., 2021).

O presente trabalho pretende avaliar a resposta do efeito de vários modos e tipos de ações em rejeitados de minério de volfrâmio, através da utilização do *Hollow Cylinder Apparatus* (HCA) e de células de trajetórias de tensões.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A liquefação induzida por sismos é considerada um dos tópicos mais relevantes, complexos e controversos na Engenharia Sísmica Geotécnica (Kramer, 1996). De forma simplificada, pode ser definida como o surgimento de elevadas pressões intersticiais da água nos poros geradas por ações cíclicas que conduzem à anulação das tensões efetivas no solo. Existem dois fenómenos distintos associados à liquefação, ambos desencadeados por ações cíclicas: a liquefação por fluxo e a mobilidade cíclica.

A liquefação por fluxo ocorre com menor frequência do que a mobilidade cíclica, mas os seus efeitos tendem a ser mais devastadores (Kramer, 1996). Este fenómeno traduz-se numa rápida transformação do solo, que inicialmente se comporta como um sólido e passa a comportar-se quase como um líquido, devido ao desenvolvimento de excessos de pressão intersticial positivos. Um exemplo notável deste tipo de instabilidade ocorreu no colapso da barragem de rejeitados de ferro de Córrego do Feijão, em Brumadinho, no Brasil (Robertson et al., 2019).

Por sua vez, a mobilidade cíclica manifesta-se quando a tensão de corte estática imposta é inferior à resistência ao corte do solo liquefeito. As deformações desenvolvem-se ao longo de toda a atividade sísmica e podem ser induzidas tanto por tensões de corte cíclicas como estáticas. Segundo Kramer (1996), a liquefação em terrenos horizontais pode ser entendida como um caso particular de mobilidade cíclica, já que a ausência de tensões de corte estáticas horizontais impede deformações laterais significativas. Nestes casos, a liquefação superficial pode provocar oscilações acentuadas do terreno durante um abalo sísmico.

Do ponto de vista experimental, vários estudos laboratoriais permitiram identificar aspetos característicos do comportamento cíclico dos solos. Seed e Lee (1965) verificaram que o desenvolvimento de deformações significativas apenas se manifesta quando a trajetória de tensões cruza a Linha de Transformação de Fase (LTF). De facto, a fase de descarga é responsável por acréscimos adicionais de pressão intersticial (Chern, 1985). Observou-se ainda que, no primeiro ciclo de carregamento, a redução da tensão efetiva é mais acentuada do que nos ciclos seguintes. Neste estágio inicial, as trajetórias de tensão localizam-se predominantemente na zona contrativa. À medida que estas evoluem e cruzam a LTF, o comportamento do solo passa para a zona dilatante, o que está associado a incrementos adicionais de pressão intersticial mais significativos (Luong e Sidaner, 1981).

Ensaaios triaxiais cíclicos não drenados em rejeitados têm igualmente demonstrado a importância destas características. Em amostras reconstituídas de rejeitados da barragem de El Torito, no Chile, consolidada isotropicamente, verificou-se que a trajetória de tensões efetivas se desloca progressivamente para a esquerda durante a carga cíclica, acompanhada por aumentos de pressão de poros e pelo desenvolvimento de deformações permanentes. Com a progressão dos ciclos, a trajetória de tensões aproxima-se da envolvente de rotura e o material pode entrar em regime de oscilações entre compressão e extensão, chegando mesmo a condições próximas de $p'=0$ (Solans et al., 2019). Coelho e Camacho (2024) mostram que a presença da LTF tem efeitos qualitativamente semelhantes em rejeitos de ferro e em solos no que respeita à forma dos caminhos de tensões efeitos observados nos ensaios triaxiais cíclicos não drenados à medida que as tensões efetivas nas amostras se reduzem.

Suazo et al. (2016) realizaram ensaios triaxiais cíclicos em rejeitados de uma mina de zinco, preparados pelo método de deposição de lamas. Os resultados mostraram que, sob carregamento cíclico, o rejeitado apresentou curvas de histerese características desse tipo de comportamento em solos. Observou-se ainda a ocorrência de liquefação por mobilidade cíclica, evidenciada pelo aumento progressivo da pressão de poros à medida que os ciclos de carga avançavam. Consequentemente, a distorção acumulada na amostra também aumentou com o número de ciclos aplicados, sobretudo nas zonas próximas da liquefação (Suazo et al., 2016).

A compreensão completa do comportamento de rejeitados de mineração requer, igualmente, o conhecimento da resposta deste material no domínio das pequenas deformações. Embora os

acidentes graves que ocorreram no passado foquem o estado limite último, a caracterização do estado limite de utilização é fundamental numa perspetiva de sustentabilidade, ao objetivar-se a valorização deste resíduo em obras geotécnicas. Para níveis de deformação muito baixos, até 0,1% (Burland, 1989), o comportamento de geomateriais é governado pelos seus parâmetros de rigidez. A rigidez inicial caracteriza o comportamento elástico do material, podendo a resposta do material ser prevista pela Lei de Hooke (Gasparre, 2005). Com o aumento das deformações, a rigidez decai e são ainda geradas deformações irreversíveis. A degradação da rigidez com o aumento das deformações segue uma curva em forma de S invertido, como representado na Figura 2. Contrariamente à rigidez inicial, que requer instrumentação local ou outros tipos de equipamentos, a degradação da rigidez pode ser estudada com equipamentos convencionais. Por último, vários estudos já concluíram que a rigidez relativa a pequenas deformações pode influenciar os processos de iniciação de liquefação (dos Santos et al, 2025; Schnaid et al, 2013). Nesse sentido, importa avaliar o impacto que os modos de corte têm na resposta de rejeitados de mineração a diferentes níveis de deformação.

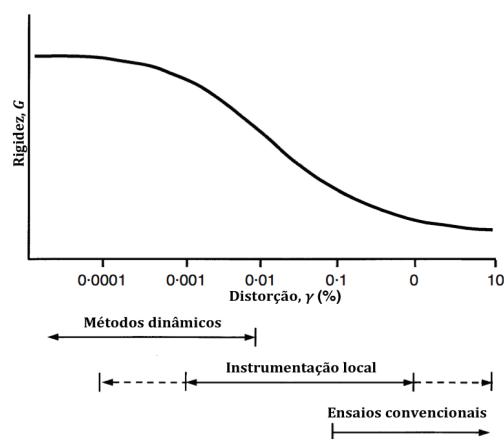


Fig. 2 – Curva típica de degradação da rigidez de corte em função da deformação (adaptado de Atkinson, 2000).

3 – MATERIAL E EQUIPAMENTO

3.1 – Rejeitados da mineração de volfrâmio

O material utilizado neste trabalho foi recolhido na mina nacional da Panasqueira, em Portugal, e serviu unicamente como exemplo de um rejeitado da mineração. Os rejeitados são provenientes desta mina subterrânea que se situa no centro-norte de Portugal, integrando os concelhos da Covilhã e do Fundão, no distrito de Castelo Branco, e Pampilhosa da Serra (distrito de Coimbra), tratando-se de uma mina que explora essencialmente tungsténio (Figura 3). São igualmente extraídas nesta mina pequenas quantidades de cobre (Antunes, 2010). A composição mineralógica dos rejeitos da mina é muito diversificada, refletindo a complexidade da sua paragénesse. Os principais minerais incluem óxidos e silicatos como o quartzo, a volframite e a cassiterite. Existe também uma quantidade significativa de sulfuretos, como a pirite, a calcopirite, a arsenopirite, a pirrotite e a blenda (Antunes, 2010; Simão, 2017). Estes minerais não só refletem a evolução hidrotermal da mina, como também influenciam diretamente a estabilidade e a gestão dos rejeitos. Importa referir que os rejeitados recolhidos são representativos do material depositado numa das barragens de rejeitados da mina, não existindo quaisquer registos ou indícios de incidentes nas estruturas de armazenamento desta mina.



Fig. 3 – Vista satélite da barragem de rejeitados da mina da Panasqueira e sua localização em Portugal.

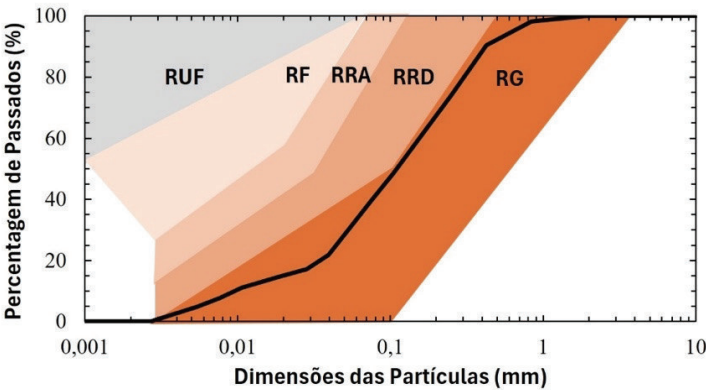
A caracterização inicial do material compreendeu a determinação da densidade das partículas sólidas, dos limites de consistência e da granulometria do material em estudo. A determinação destes parâmetros seguiu o especificado nas normas portuguesas e britânicas, respetivamente, a NP 83 (LNEC, 1965), a BS 1377 (British Standard, 1975) bem como a NP 143 (LNEC, 1969) e, por fim, a E 196 (LNEC, 1966). O Quadro 1 resume os resultados destes ensaios de identificação. A densidade das partículas sólidas (G) enquadra-se na variação de valores propostos para os rejeitos de minas por Fourie et al. (2021) e Hu et al. (2016), sendo o valor mais elevado do que o normalmente encontrado em solos naturais, devido à presença de diferentes metais e minerais nos rejeitos. O índice de vazios *in situ* (e_0) varia entre 0,62 e 0,75, como observado por Oliveira et al. (2024a). Por depender do processo de deposição, este parâmetro não pode ser diretamente comparado com outros resultados. Porém, ele está de acordo com os resultados publicados por Rodríguez et al. (2021).

A determinação dos limites de consistência, nomeadamente o limite de liquidez (w_L) e limite de plasticidade (w_P), também forneceu resultados semelhantes aos propostos para outros rejeitados de mineração, nomeadamente cobre (Hu et al., 2016), ouro (Islam, 2021), prata, zinco e chumbo (Malekzadeh et al., 2015). Tomando como referência os rejeitados de mineração de ferro, cujo processo de extração inclui, tal como para o volfrâmio, fases de trituração, moagem e separação por gravidade, verifica-se que os valores obtidos para o limite de liquidez e o limite de plasticidade enquadram-se, respetivamente, nos intervalos [4 – 60] e [9,3 – 32,4] que resultam das compilações apresentadas por Macedo e Vergaray (2022) e Carneiro et al (2023). A análise granulométrica efetuada revela que os rejeitos da Panasqueira são compostos por 16% de argila, 73% de silte e 11% de areia, sendo a curva granulométrica obtida apresentada na Figura 4. Com base na norma D 2487-06 (ASTM, 2006), este material é classificado como areia argilosa (SC), corroborando a sugestão

de Witte et al (2017) de que os rejeitos de mina podem ser vistos como solos de transição entre areias e argilas, com diferentes densidades e, conseqüentemente, diferentes propriedades mecânicas. Por se tratarem de geomateriais não convencionais, Witte et al. (2017) apresentaram uma classificação alternativa baseada na distribuição de tamanhos, considerando alguns fatores que influenciam as características dos rejeitos de minas. Segundo esta proposta, os rejeitos da mina da Panasqueira classificam-se como rejeitos granulares, assemelhando-se a areias siltosas não plásticas.

Quadro 1 – Resultados dos ensaios de identificação.

Índices físicos		Caraterísticas granulométricas				Caraterísticas de plasticidade		
G (-)	e (-)	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	C _u (-)	C _c (-)	W _L (%)	W _P (%)	IP (%)
3,15	0,62-0,75	0,01-0,014	≈ 0,12	10,7-17,5	1,78-1,88	23,3	14,7	8,6



RG: Rejeitados Grosseiros; **RRD:** Rejeitados de rocha dura; **RRA:** Rejeitados de rocha alterada; **RF:** Rejeitados Finos; **RUF:** Rejeitados ultrafinos.

Fig. 4 – Curva granulométrica dos rejeitados em estudo representada em simultâneo com a classificação apresentada por Witte et al (2017).

3.2 – Célula de trajetória de tensões

Os ensaios triaxiais monotónico e cíclico foram realizados numa célula de trajetória de tensões hidráulica do tipo Bishop e Wesley (1975) que permite ensaiar amostras com 38 mm de diâmetro e 76 mm de altura até tensões máximas de 1000 kPa. A amostra de solo repousa sobre o pedestal, que está ligado ao veio do equipamento, podendo ser acoplada à célula de carga através de um topo de ligação em borracha à placa de topo da amostra, através da aplicação de sucção. Esta ligação é obrigatória aquando da realização de ensaios cíclicos que envolvam extensão, mesmo que temporária, e recomendada em ensaios de compressão monotónica para reduzir erros de ajustes iniciais. O pedestal pode deslocar-se verticalmente nos dois sentidos, sendo controlado ou por uma interface ar/água ou por atuadores do tipo CRSP (*Constant Rate of Strain Pump*). A contrapressão e a pressão na câmara são controladas por um medidor volumétrico e uma interface ar-água, respetivamente. A pressão nestes equipamentos é fornecida por um sistema de ar comprimido e controlada por controladores de pressão de regulação automática. As pressões de serviço máximas destes controladores são aproximadamente 800 kPa. Informações mais detalhadas sobre o funcionamento destes equipamentos podem ser encontradas em Venda Oliveira (1992).

3.3 – *Hollow Cylinder Apparatus* da Universidade de Coimbra

O equipamento de ensaios sobre cilindros ocos, comumente designado por HCA, foi inicialmente desenvolvido para permitir uma melhor simulação das trajetórias de tensões experimentadas por fundações offshore, usualmente submetidas a estados de tensão em que as três tensões principais são diferentes, sendo acompanhados de rotação da direção das tensões (Symes, 1983). Desde as suas primeiras configurações, os equipamentos laboratoriais evoluíram, tendo o equipamento da Universidade de Coimbra sido desenvolvido e construído no Imperial College London com a designação de HCA Mark II. Tal como é descrito em Viana da Fonseca et al. (2021), este equipamento permite ensaiar amostras de secção oca com duas geometrias: i) amostras pequenas com 60 mm diâmetro interno (D_i), 100 mm de diâmetro externo (D_o) e 200 mm de altura (H); ii) amostras grandes com 150 mm diâmetro interno, 200 mm de diâmetro externo e 300 mm de altura. Além de amostras de secção oca, o equipamento pode ensaiar amostras cilíndricas convencionais, de secção cheia, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, bastando, para este efeito, trocar as placas rígidas das extremidades das amostras. Na Figura 4a ilustra-se esquematicamente o equipamento da Universidade de Coimbra.

O princípio básico de funcionamento do HCA baseia-se na combinação independente dos esforços/pressões: uma carga axial, momento torsor, pressão interna, pressão externa e contrapressão numa amostra cilíndrica oca. As pressões de confinamento interna (na cavidade interna) e externa (em redor da parede exterior da amostra) são aplicadas pela água através de interfaces ar água ou de atuadores do tipo CRSP. A contrapressão é aplicada por via de um medidor volumétrico enquanto as cargas axial e de torção são aplicadas e controladas por dois conjuntos de atuadores, instalados numa plataforma de transferência no inferior da estrutura do HCA. Os sistemas de atuadores estão conectados ao eixo de carregamento do equipamento. O esforço e a deformação axiais são induzidos pelo atuador P_1 ao eixo central do equipamento. Um atuador P_4 (que não é representado na Figura 4a, que está constantemente sob pressão, garante que a plataforma de transferência desce quando trajetórias de extensão são aplicadas a amostra. Na plataforma móvel de transferência estão igualmente colocados mais dois atuadores (P_2 e P_3) ligados ao veio central através dum sistema de corrente e rodas dentadas que são responsáveis pela aplicação da torção e, consequentemente, da rotação no plano horizontal. O atuador P_3 , que está sob pressão de ar, funciona como atuador de compensação, garantindo que a corrente está sempre tracionada. Um sistema de rolamentos e o uso de materiais de reduzido atrito permitem a separação dos dois esforços aplicados. A plataforma de transferência, e consequentemente os atuadores P_2 e P_3 , é livre de se movimentar verticalmente devido a um sistema de rolamentos ligados a dois dos quatro pilares da estrutura (Minh, 2006; Araújo Santos, 2015). Todas as linhas de pressão e de aplicação de carga estão ligadas a um quadro de controlo, que permite o controlo manual das pressões ou a verificação das mesmas. O quadro de controlo dispõe igualmente de uma linha de pressão/sucção independente que possibilita, por exemplo, processos de preparação ou saturação de amostras sem equipamentos adicionais.

O controlo e a monitorização dos ensaios utilizam uma vasta gama de instrumentos de medição. Medições locais referem-se a registos de deformações retirados entre dois pontos numa zona central ao longo da parede da amostra ou no seu plano transversal médio. As medições referentes a deslocamentos do topo da amostra relativamente à base ou a variações de volume são designadas por medições globais. Note-se que, a designação de instrumentação interna, frequente em outros equipamentos laboratoriais, não é utilizada no HCA, sendo reservada para as informações referentes à cavidade interna da amostra.

A instrumentação local é constituída por quatro tipos de equipamentos. Um LVDT colocado a meia altura nas paredes internas da amostra mede a deformação radial destas paredes. Um conjunto de três sensores de proximidade, cujo funcionamento se baseia no princípio de impedância entre uma fonte emissora (sensor) e um alvo (folha de alumínio com sensivelmente $9,5 \text{ cm}^2$), mede a deformação radial da parede exterior. Os alvos e os sensores estão distribuídos de forma equidistante

no mesmo plano horizontal a meia altura nas paredes externas, ou seja, estão separados por ângulos de 180°. Dois eletróníveis biaxiais, instalados a meia altura na parede exterior da amostra registam deformações axiais e angulares. O correto funcionamento dos instrumentos requer que sejam instalados em zonas diametralmente opostas da amostra. Embora estes equipamentos permitam o registo das duas deformações, apenas conseguem registar uma de cada vez, requerendo a intervenção do operador para alterar a orientação de leitura. Por fim, um eletrónível uniaxial instalado a meia altura da parede exterior da amostra mede a deformação angular da amostra. Os três eletróníveis são instalados entre os espaços proporcionados pelos sensores de proximidade, garantindo que, em função do ensaio a realizar, não exista interação física entre os vários instrumentos. A Figura 5b ilustra o posicionamento vertical de todos os instrumentos de medição local. Viana da Fonseca et al. (2021) ilustra vários pormenores sobre o processo de calibração da instrumentação interna, estando toda a metodologia detalhadamente descrita em Araújo Santos (2015).

A instrumentação global é constituída por dois transdutores de deslocamento e dois medidores volumétricos. Os deslocamentos axial e angular da amostra são medidos pelos defletómetros instalados sobre a plataforma móvel de transferência. Enquanto o defletómetro axial mede diretamente o movimento vertical do pedestal em que a amostra está instalada, não é possível registar diretamente a rotação do veio central, ao qual está ligado o pedestal que suporta a amostra. De facto, o defletómetro mede a variação do cateto oposto do ângulo ao centro relativo à rotação do veio, através de uma cantoneira aparafusada ao veio central do equipamento. A Figura 5a ilustra o posicionamento dos dois defletómetros.

Por fim, a medição da força axial e do momento torsor e das pressões é realizada através da célula de carga e de transdutores de pressão. A célula de carga combinada regista a força axial, numa gama de valores entre -6 kN e 8 kN, e o momento torsor, de ± 400 Nm. Os quatro transdutores de pressão instalados registam pressões até 1000 kPa nas linhas referentes à contrapressão no topo e da base da amostra, à pressão interna e à pressão externa. A descrição pormenorizada do HCA e de todos os instrumentos de medição, bem como equações de controlo, pode ser consultada em Araújo Santos (2015).

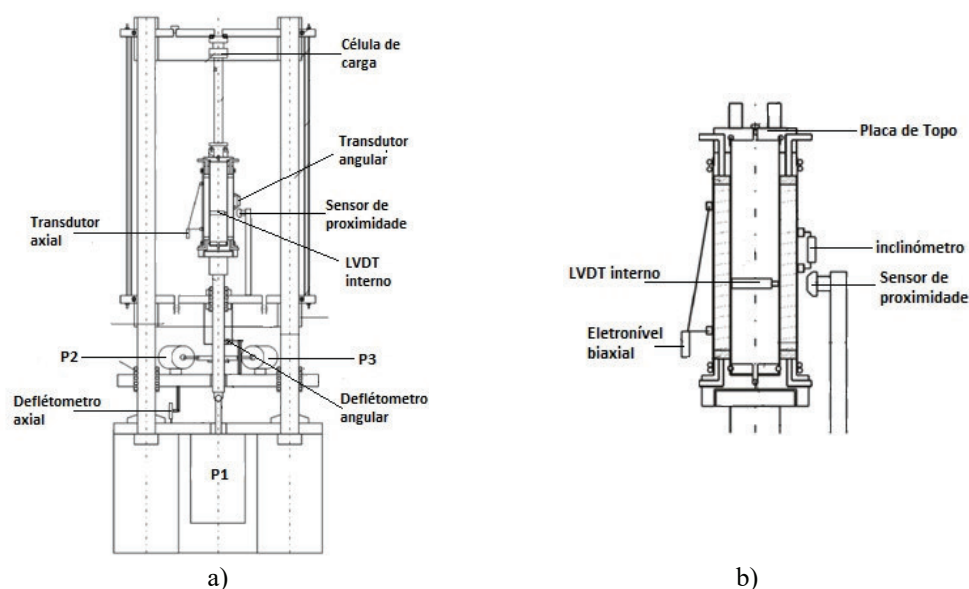


Fig. 5 – Representação esquemática do HCA da Universidade de Coimbra: a) Representação esquemática do equipamento; b) Esquema representativo do sistema de instrumentação local (adaptado de Minh 2006 e Araújo Santos, 2015).

4 – PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS

Para que um trabalho laboratorial que visa o estudo e compreensão da resposta de ações externas de solos ou geomateriais seja bem sucedido, qualquer que seja o equipamento laboratorial utilizado, é necessário obter amostras intactas ou reconstituídas/remoldadas de qualidade. Nesse sentido, e tendo em conta que os rejeitados da mineração são geomateriais não convencionais, a utilização de amostras reconstituídas assume um papel fundamental, desde que estas sejam representativas do comportamento real e produzidas por métodos repetíveis e replicáveis.

Kuerbis et al. (1988) fazem uma revisão de várias técnicas para o fabrico de amostras de materiais granulares e concluem que o método de deposição de lamas é mais apropriado para a simulação de ambientes aquáticos em que a deposição é mais rápida. O método tem sido amplamente reconhecido como capaz de reproduzir condições próximas das observadas em solos aluvionares naturais e, em particular, em rejeitados dispostos em barragens, onde o material é depositado sob a forma de lama. No caso da mina da Panasqueira, a deposição dos rejeitados é realizada em condições subaéreas. Os rejeitados, sob a forma de lama, são encaminhados para a barragem e descarregados através de diversos pontos de deposição (Ávila et al., 2008). Face ao exposto, opta-se por recorrer a esta técnica para a reconstituição de amostras. Contudo, é importante salientar que, atualmente, têm sido implementadas técnicas mais recentes de deposição, como pilhas de rejeitados drenadas, nas quais os rejeitados são previamente filtrados e, em certos casos, compactados.

A preparação do equipamento, assim como a montagem de todos os componentes relativos ao ensaio, segue o procedimento indicado por Araújo Santos (2015), com a exceção da técnica de deposição do material utilizado. Os principais passos da técnica desenvolvida foram adaptados da técnica inicialmente utilizada por Carraro e Prezzi (2008). Mais recentemente, foi proposto um método de deposição de lamas por Dominguez-Quintans et al. (2023) que garante a homogeneidade de amostras de solo não uniforme, como é o caso do geomaterial em estudo. Porém, devido às limitações resultantes da configuração da câmara do HCA, da dificuldade de moldar amostras de secção oca e do peso dos componentes necessários à preparação de amostras, a implementação de processos que exigem algum tipo de movimentação da amostra acarreta riscos consideráveis para o técnico e o equipamento.

Para realizar a mistura dos rejeitados com a quantidade de água pretendida foi desenvolvido um equipamento que permite a mistura mecânica dos rejeitados com a água (Figura 6a). Através da misturadora foi possível realizar a mistura de forma idêntica, promovendo uma mistura bastante homogênea (Figura 6b). O procedimento consiste em colocar na cuba metálica os rejeitados e a quantidade de água pretendida e colocar o agitador mecânico em funcionamento durante cerca de 2 min. De facto, tal como demonstrado por Raposo (2016), o processo de agitação da mistura até ao momento imediatamente antes da deposição é fundamental manter uma mistura uniforme e com quantidades mínimas de ar incorporado. Após este tempo, desliga-se a misturadora da corrente elétrica e abre-se a torneira que se localiza na parte inferior da cuba metálica para depositar a pasta por gravidade no molde do equipamento que se pretende executar o ensaio (Figura 6a). O teor em água definido para preparar a pasta tem em consideração dois aspetos: evitar segregação, que aumenta com o aumento do teor em água (Raposo, 2016), e assegurar uma deposição contínua da pasta. No caso de se utilizar um teor em água próximo do limite de liquidez dos rejeitados da mina da Panasqueira (LL = 23%), a deposição da pasta não ocorre de forma contínua. Optou-se assim por utilizar um teor em água de 27%, que permite uma deposição contínua e sem segregação da pasta, o que garante a qualidade das amostras. No topo dos moldes da amostra é colocada uma alonga (Figura 6c), seguindo-se da deposição da pasta, com um movimento circular, até a pasta atingir a superfície da alonga.

A utilização da alonga garante a obtenção de uma amostra homogênea ao longo de toda a altura da amostra, como é referido por Oliveira et al. (2024b). Esta peça foi desenvolvida com o objetivo de se depositar mais pasta, para fazer face ao assentamento, que ocorre no interior dos moldes, após a deposição. De facto, após a deposição do rejeitado na coroa circular da amostra, verifica-se a

ocorrência de um processo de sedimentação, acompanhado pela expulsão de água dos poros da amostra através do topo da amostra. Para garantir amostras homogêneas, quaisquer que sejam os equipamentos laboratoriais utilizados, vários provetes de teste foram preparados e o tempo de sedimentação e o respetivo assentamento à superfície foram registados, conforme ilustrado na Figura 7a. Verificou-se que 50 % do assentamento do topo da amostra decorre na primeira hora de sedimentação das partículas da pasta, sendo que, após quatro horas do processo de deposição, 80 % do assentamento já ocorreu. Face a estes resultados, estipulou-se um período de espera entre a deposição da pasta de rejeitado e as fases subsequentes da preparação de amostras de 12 horas.



Fig. 6 – Sequência de montagem de amostras de rejeitados da mineração no HCA.: a) agitador mecânico; b) mistura dos rejeitados na cuba metálica; c) alongo após a deposição da pasta; d) amostra após assentamento; e) amostra com sucção; f) amostra com a instrumentação local instalada dentro da campânula.

Findo o período de sedimentação, retirou-se a alonga, assim como todo o excedente de pasta que ficou acima da superfície dos moldes. O excedente de pasta foi rasado ao nível do molde exterior e procedeu-se à limpeza de todas as partículas que se encontram sobre as membranas, para evitar problemas de fugas e/ou possíveis danos nas membranas derivado da elevada angularidade das partículas (Figura 6d). Após o processo anterior, procedeu-se à montagem da placa de topo da amostra (Figura 6e) que permite a aplicação de sucção na amostra para remover os moldes, instalação dos restantes componentes, entre os quais a instrumentação local. O nível de sucção a aplicar depende das características próprias dos equipamentos, do tipo de amostras e do ensaio a realizar, devendo ser aplicado a partir da base da mesma e aguardar-se que este estado de tensão induzido na amostra se instale homogeneamente em toda a sua altura. Caso seja aplicada sucção simultaneamente no topo e na base da amostra, poderá verificar-se estrangulamento no topo, em virtude da baixa permeabilidade característica deste rejeitado de mineração, tal como se ilustra na Figura 7b. O processo de preparação da amostra termina com o enchimento com água da cavidade interior da amostra, a colocação da campânula exterior e o seu preenchimento com água e a subida de pressões (Figura 6f).

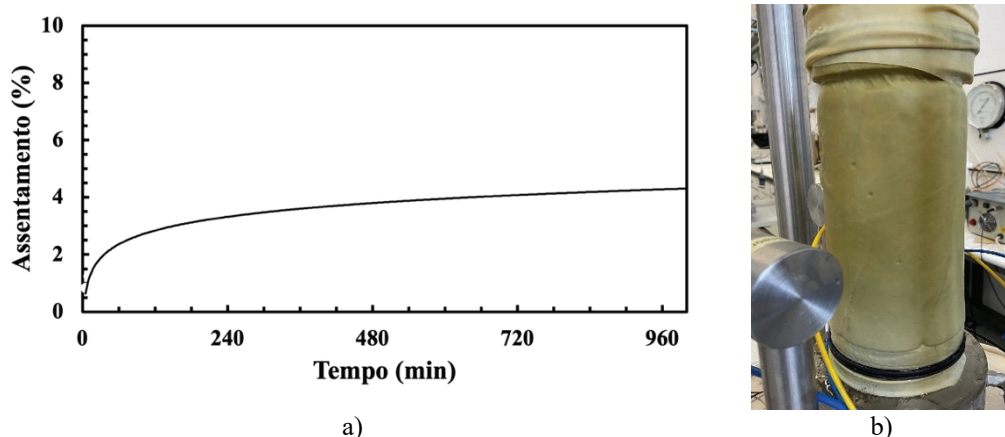


Fig. 7 – Efeitos a considerar na preparação de amostras no HCA por deposição de lamaz: a) assentamento por sedimentação após o processo de deposição; b) estrangulamento do topo da amostra aquando de aplicação de sucção pelo topo.

Na preparação de amostras cilíndricas de secção cheia, ensaiadas no equipamento triaxial, o procedimento é em tudo idêntico com a exceção da utilização da alonga. Neste equipamento, como a altura do molde é superior à altura final da amostra, apenas tem de se garantir, com base na experiência acumulada nos ensaios de teste, uma deposição de material suficiente para, após o processo de sedimentação, se atingir a altura de amostra pretendida. As paredes verticais da membrana devem ser igualmente limpas para evitar que se danifiquem durante a colocação da pedra porosa e da placa de topo.

5 – INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL

A presente investigação laboratorial envolve 5 ensaios laboratoriais: dois ensaios triaxiais (TX) e três ensaios de torção (HCA), cujas principais características se resumem no Quadro 2. Note-se que, no equipamento triaxial, a tensão axial (σ_a) corresponde à tensão vertical (σ_v) e as tensões radial (σ_r) e circunferencial (σ_θ) são iguais, sendo designadas de tensão horizontal (σ_h). O conhecimento da contrapressão inicial (u_0) permite definir o estado de tensão efetiva inicial da amostra, caracterizado pela sua tensão principal efetiva média (p'_0 , sempre igual a 100 kPa nos ensaios considerados). Foram realizados dois ensaios de torção cíclicos (C), diferenciados pelos números

“1” e “2” na sua designação, assim como um ensaio de torção monotónico (M), sendo a mesma designação adotada para os ensaios triaxiais. Todas as amostras foram preparadas segundo a metodologia descrita na Secção 4, tendo-se obtido, imediatamente após a deposição e antes do corte, um índice de vazios de 0,851. Após as fases de sedimentação, saturação ($B \geq 0,98$) e consolidação, o índice de vazios no início da fase de corte varia entre 0,529 e 0,552. Esta diferença deve-se sobretudo ao processo de sedimentação inicial, ilustrado na Figura 7a, que promove um rearranjo estrutural progressivo do rejeitado ao longo da deposição, sendo posteriormente acentuada pelas etapas de saturação e consolidação, que contribuem para a redução adicional do índice de vazios. Qualquer que seja o tipo ou modo de corte, todas as amostras foram ensaiadas com uma taxa de corte igual, isto é, $\Delta\epsilon_a = \Delta\gamma_{z\theta} = 0,25 \text{ \%}/h$.

Quadro 2 – Características dos ensaios para avaliação do comportamento tensão-deformação.

Designação	Equipamento	Consolidação				Corte		
		Tipo	$\sigma_a, \sigma_r, \sigma_\theta$ (kPa)	u_0 (kPa)	p'_0 (kPa)	Drenagem	Tipo	Modo
TX-100-M	Triaxial	Isotrópico	630	530	100	Não drenado	Monotónico	Compressão
TX-100-C	Triaxial		630	530	100		Cíclico	Compressão/ Extensão
HCA-100-M	HCA		630	530	100		Monotónico	Torção
HCA-100-C1	HCA		630	530	100		Cíclico	Torção
HCA-100-C2	HCA		630	530	100		Cíclico	Torção

5.1 – Validação dos ensaios

A qualidade da metodologia desenvolvida para a preparação de amostras foi demonstrada por Oliveira et al. (2024b) ao comparar trajetórias de tensões para ensaios de compressão monotónicos para diferentes tensões efetivas iniciais. Idênticas conclusões podem ser retiradas da análise do início das trajetórias de tensões dos vários ensaios monotónicos e cíclicos realizados, ilustradas na Figura 8. Independentemente do tipo de carregamento, na sua fase inicial, todos os ensaios apresentam trajetórias de tensões similares. Este resultado era expectável uma vez que, no primeiro ciclo de carga e até ocorrer inversão de direção de aplicação de carga, as ações monotónica e cíclica são iguais. Os troços iniciais das trajetórias de tensões refletem igualmente as diferenças resultantes dos modos de carregamento. As amostras submetidas a trajetórias de compressão demonstram ter um comportamento contrativo mais acentuado, derivado da maior geração de pressões intersticiais (Figura 11). Ou seja, para iguais níveis de tensão principal intermédia, a tensão de corte mobilizada nos ensaios triaxiais é inferior à mobilizada nos ensaios de torção. Para tal contribui a influência do fator de tensão principal intermédia, que em trajetórias de compressão é nulo e, em trajetórias de torção simples é 0,5. Tal como é demonstrado por Araújo Santos (2015), a resistência ao corte mobilizada em solos granulares em ensaios de torção é superior à mobilizada em ensaios de compressão.

Outro aspeto fundamental da validação dos resultados obtidos é a calibração dos instrumentos de medição utilizados no controlo dos ensaios. No presente caso, embora se tenha verificado a calibração de todos os instrumentos do HCA, algum erro afetou a calibração à torção da célula de carga, dando origem a uma resposta algo distinta da prevista. De facto, contrariamente aos ensaios triaxiais cíclicos, em que se verifica uma inversão das direções das tensões principais aquando da inversão de compressão para extensão, nos ensaios de torção, a inversão de direção do momento torsor não afeta a direção das tensões principais. Em consequência, é usual verificar-se, nos ensaios cíclicos no HCA, uma simetria das trajetórias de tensões e do comportamento tensão-deformação para valores de tensões ou distorções positivas e negativas, respetivamente, para areias (Araújo

Santos, 2015). Por oposição, nos ensaios triaxiais cíclicos, verifica-se uma maior geração de pressões intersticiais em extensão, originando maior acumulação de distorções neste sentido de carregamento. O erro de calibração da célula de carga do HCA originou uma resposta dos rejeitos de mineração que originava, de forma irrealista, maior geração de pressões intersticiais e distorções num sentido da torção, tal como se ilustra na Figura 9. Este erro foi corrigido e os restantes resultados apresentados no artigo são representativos do comportamento real dos rejeitados ensaiados.

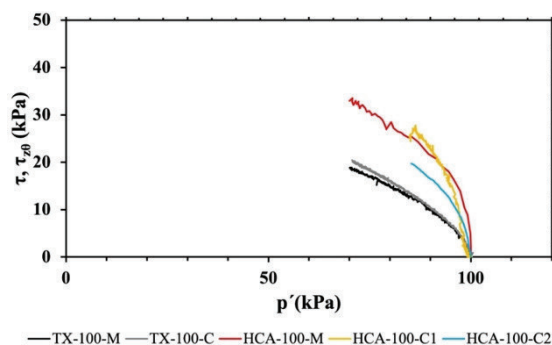


Fig. 8 – Tramo inicial das trajetórias de tensões para os vários ensaios realizados; b) influência da qualidade da calibração da célula de carga nos resultados.

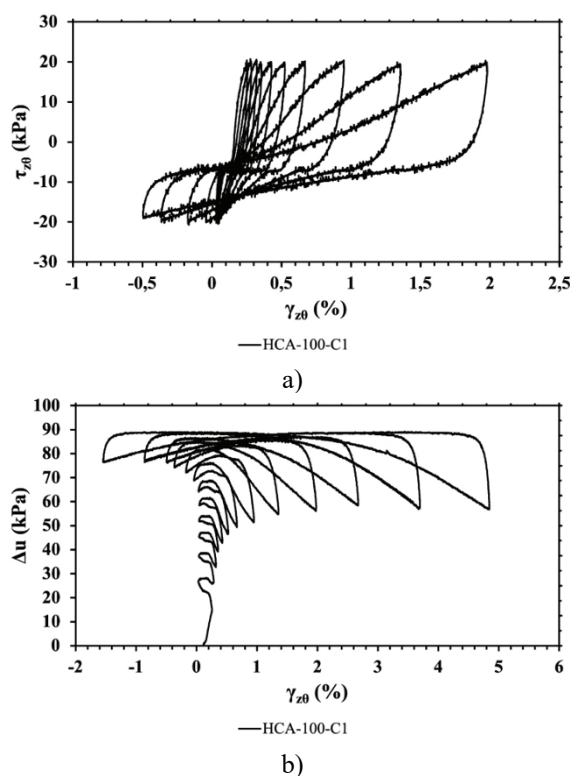


Fig. 9 – Efeitos de um erro de calibração da célula de carga nos resultados de ensaios cíclicos no HCA: a) comportamento tensão deformação; b) geração de pressões intersticiais em função do nível de deformação.

5.2 – Resposta dos rejeitados sob ações generalizadas

Inicia-se a análise da resposta dos rejeitados de tungsténio pela comparação entre as trajetórias de tensões dos carregamentos monotónicos e cíclicos (Figura 10). Como referindo anteriormente, existe uma satisfatória sobreposição das trajetórias até ocorrer inversão da direção de aplicação da carga para ambos os modos de carregamento. Quando submetidas a carregamentos monotónicos, as amostras contraem até atingirem o estado de transformação de fase, altura em que começam a dilatar e a pressão intersticial se reduz durante o corte, quer nos ensaios de carga axial (Figura 11a) quer nos ensaios de torção (Figura 11b). À semelhança do que acontece em solos granulares, este comportamento manter-se-á até atingir o estado crítico. Note-se que o modo de carregamento tem uma influência significativa na geração de pressão intersticial. No ensaio de carregamento axial, a redução de geração de pressão intersticial para extensões maiores é pouco significativa, mantendo-se praticamente constante. No ensaio de torção, a geração de pressões reduz drasticamente, verificando-se gerações negativas de pressões intersticiais (Figura 11b) que conduzem a um aumento da tensão de corte (Figura 10b). Idêntica influência do modo de carregamento é verificada quando se comparam ensaios de compressão e de extensão.

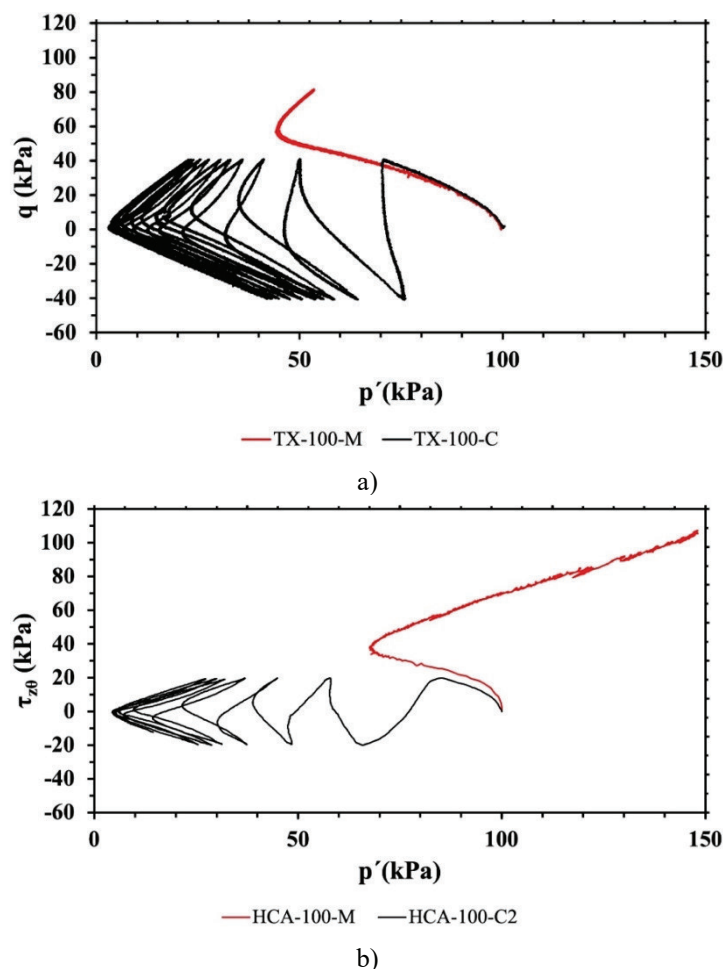


Fig. 10 – Trajetórias de tensões dos ensaios monotónicos e cíclicos: a) ensaios de carga axial; b) ensaios de torção.

Quando submetidas a carregamentos cíclicos, as trajetórias de tensões obtidas (Figura 10) revelam que o primeiro ciclo de carregamento induz excessos de pressão intersticial superiores aos ciclos seguintes, tal como referido por Suazo et al. (2016). Esta resposta é independente do modo de carregamento. Nos ciclos seguintes, o incremento de pressão intersticial, embora seja mais pequeno entre ciclos consecutivos, vai reduzindo o estado de tensão efetiva conduzindo à ocorrência de liquefação por mobilidade cíclica. Este mecanismo é igual ao observado nos ensaios triaxiais cíclicos realizados com rejeitados de zinco e da barragem de El Torito, apresentados respetivamente por Suazo et al. (2016) e Solans et al. (2019), ou de rejeitados de ferro, apresentados por Coelho e Camacho (2024). Além disso, a anisotropia de comportamento observada relativamente aos caminhos de tensões seguidos pelas amostras no carregamento cíclico pós-liquefação ilustram a importância do caminho de tensões imposto à amostra, tanto em compressão e extensão triaxial (Figura 10a) como no corte torsional imposto no HCA (Figura 10b), tal como identificado por Fanni et al. (2024) e Fanni et al. (2025) através de ensaios monotónicos.”

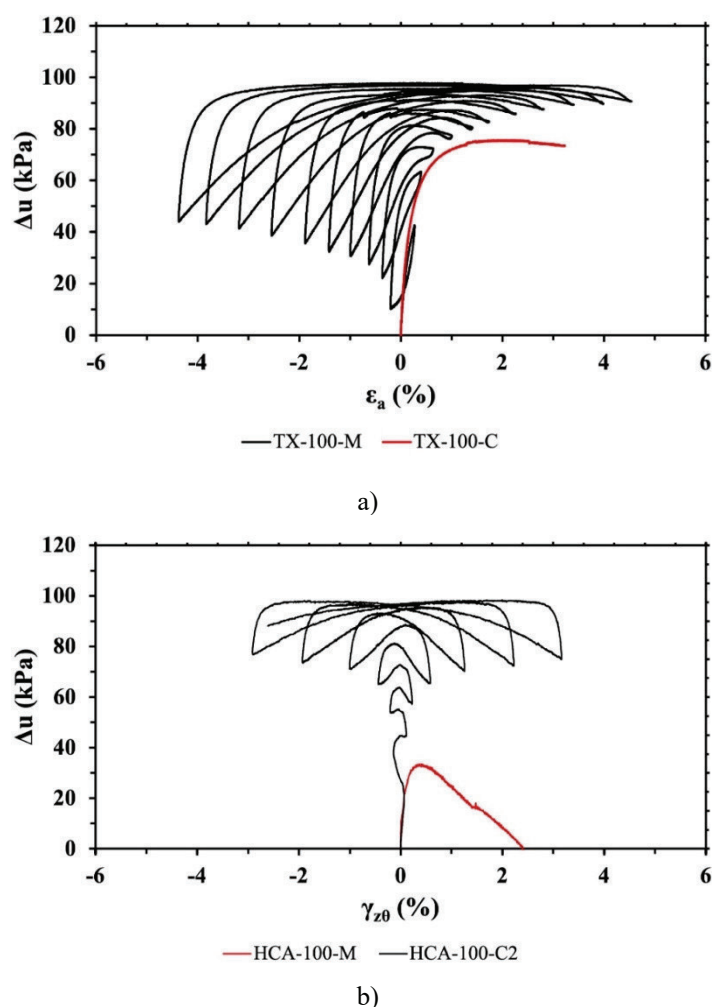


Fig. 11 – Geração de pressões intersticiais durante os ensaios monotónicos e cíclicos:
a) ensaios de carga axial; b) ensaios de torção.

Após ocorrência de liquefação por mobilidade cíclica, a amplitude de geração intersticial num ciclo é máxima e sensivelmente constante entre ciclos consecutivos. Como se pode observar na Figura 11a, existe uma concentração da geração intersticial quando a amostra está submetida a trajetórias de extensão axial no decorrer dos ensaios cíclicos axiais, corroborando o referido anteriormente em relação à influência do modo de carregamento. Por sua vez, nos ensaios de torção (Figura 11b), a geração de pressões intersticiais ocorre de forma praticamente simétrica, dado não se verificar rotação repentina das direções das tensões principais.

O comportamento tensão-deformação observado nas mesmas amostras está ilustrado na Figura 12. Em ambos os modos de sollicitação monotónica, as amostras apresentam um comportamento de deformação com endurecimento no seu caminho para o estado crítico.

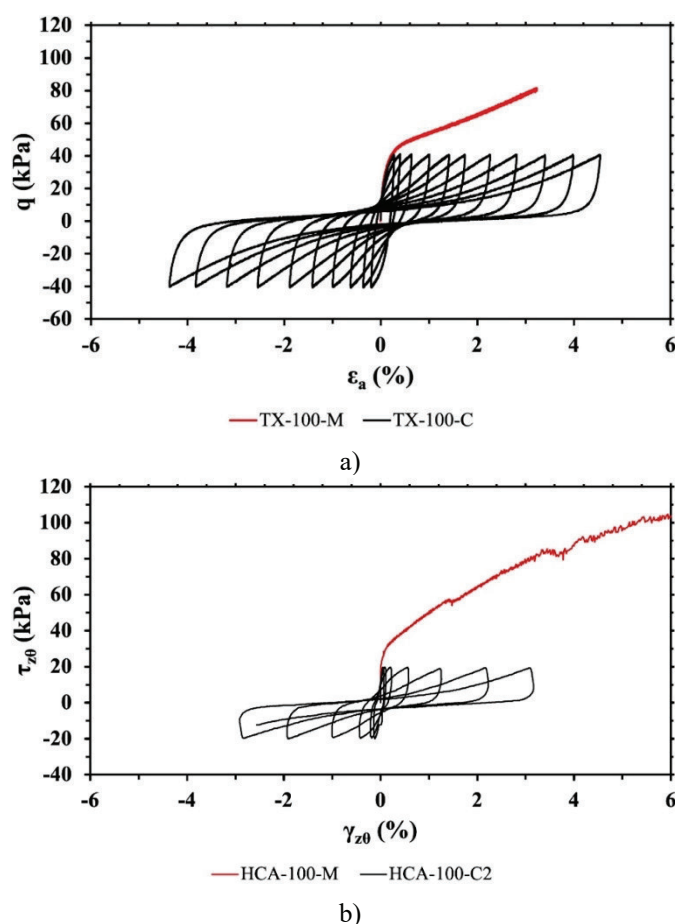


Fig. 12 – Comportamento tensão-deformação resultante da aplicação de carregamentos monotónicos e cíclicos: a) ensaios de carga axial; b) ensaios de torção.

No que se refere às sollicitações cíclicas, verifica-se que, no caso da sollicitação axial, existe uma simetria algo inesperada de extensões axiais durante as fases de carregamento em compressão e extensão. Esta observação contraria resultados anteriores, nomeadamente os propostos por Suazo et al. (2016), em que as extensões axiais tendem a acumular-se em extensão. Note-se que, em solos granulares, tende a verificar-se, igualmente, esta tendência assimétrica na acumulação de extensões axiais. Nos ensaios de torção cíclica, as distorções acumulam-se simetricamente nas duas direções de carregamento, tal como se observa em geral nos solos granulares.

De notar ainda que, em nenhum dos dois modos de carregamento, se verificou a anulação das tensões efetivas nos ensaios cíclicos (Figura 10). A razão de pressões intersticiais (r_u), que se define como o quociente entre a variação da pressão intersticial (Δu) e a tensão efetiva inicial (p'_0), atingiu, no máximo, 0,95. Idêntico comportamento é observado nos resultados apresentados por Suazo et al. (2016), o que pode resultar dos efeitos da direção das tensões principais induzidas durante o carregamento cíclico, cuja influência no carregamento monotónico é claramente demonstrado por Fanni et al. (2024) e Fanni et al. (2025).

5.3 – Comportamento para pequenas deformações

No domínio das pequenas deformações, o comportamento de solos depende de dois aspetos fundamentais: a rigidez de corte inicial e a degradação da rigidez com o aumento da deformação. No presente estudo, por não terem sido utilizados instrumentos de medição local nos dois equipamentos, nomeadamente na célula de trajetórias de tensões, não são apresentados resultados referentes à degradação da rigidez dos rejeitados de mineração de volfrâmio para níveis de deformação relativos às muito pequenas deformações.

No estudo da degradação da rigidez de corte, definem-se dois módulos de distorção ou deformabilidade: o módulo tangente e o módulo secante. Contrariamente aos carregamentos monotónicos, o conhecimento do módulo tangente não é representativo do comportamento do solo num ciclo de carregamento (Kramer, 1996). Nestas condições, a definição do módulo secante, que se define como o declive da reta que une as duas extremidades do ciclo histerético de tensão-deformação, fornece informações mais úteis para avaliar o comportamento do solo (Rascol, 2009). Por uma questão de coerência, definem-se, para os dois tipos de carregamento, apenas os módulos secantes. Adicionalmente, a comparação de resultados obtidos em dois modos de carregamento diferentes (torção e axial) requer que os resultados sejam representados num mesmo plano, optando-se pelo módulo de distorção e pela distorção.

Nesse sentido, o módulo de distorção secante (G_{sec}) obtido de ensaios de torção no HCA é obtido através da equação (1), que relaciona a tensão de corte (τ) e a distorção (γ), em que o índice (0) se refere à situação inicial. O módulo de distorção resultante dos ensaios triaxiais é obtido por aplicação da equação (2). Em condições triaxiais e não drenadas, em que o coeficiente de Poisson assume o valor 0,5, a tensão de desvio (q) e a extensão triaxial de desvio (ε_s) são obtidos pela equação (3) e (4), respetivamente. Nestas equações σ_{ver} , σ_{hor} , ε_{ax} e ε_{rad} representam a tensão vertical, a tensão horizontal, a extensão axial e a extensão radial, respetivamente. Nas condições enunciadas, é possível estimar a distorção através da aplicação da equação (5).

$$G_{sec} = \frac{\tau - \tau_0}{\gamma - \gamma_0} \quad (1)$$

$$G_{sec} = \frac{\Delta q}{3 \cdot \Delta \varepsilon_s} \quad (2)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{vert} - \sigma_{hor} \quad (3)$$

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_{ax} - \varepsilon_{rad}) \quad (4)$$

$$\gamma = \varepsilon_{ax} - \varepsilon_{rad} = (1 + \nu) \cdot \varepsilon_{ax} = 1,5 \cdot \varepsilon_{ax} \quad (5)$$

A variação do módulo de distorção secante com a evolução da distorção nos ensaios monotónicos e cíclicos realizados na célula de trajetória de tensões e no HCA está representada nas figuras a) e b) da Figura 13, respetivamente. Os efeitos do modo de corte são mais visíveis nos ensaios monotónicos (Figura 13a), obtendo-se um comportamento mais rígido nos ensaios de torção do que nos ensaios de corte axial. Este comportamento pode dever-se ao efeito da tensão principal intermédia na resposta dos solos aos carregamentos impostos, à semelhança do que é observado no estudo dos parâmetros de resistência em solos granulares (Araújo Santos, 2015). Embora o HCA esteja equipado com instrumentação local, as comparações de resultados e conclusões apresentadas resultam de leituras registadas na instrumentação global no HCA e externa no equipamento triaxial, reduzindo possíveis erros associados ao cálculo do módulo de distorção. Note-se, todavia, que tal efeito não seria suficiente para justificar as diferenças observadas para níveis de G relativamente elevados, como os observados nos ensaios.

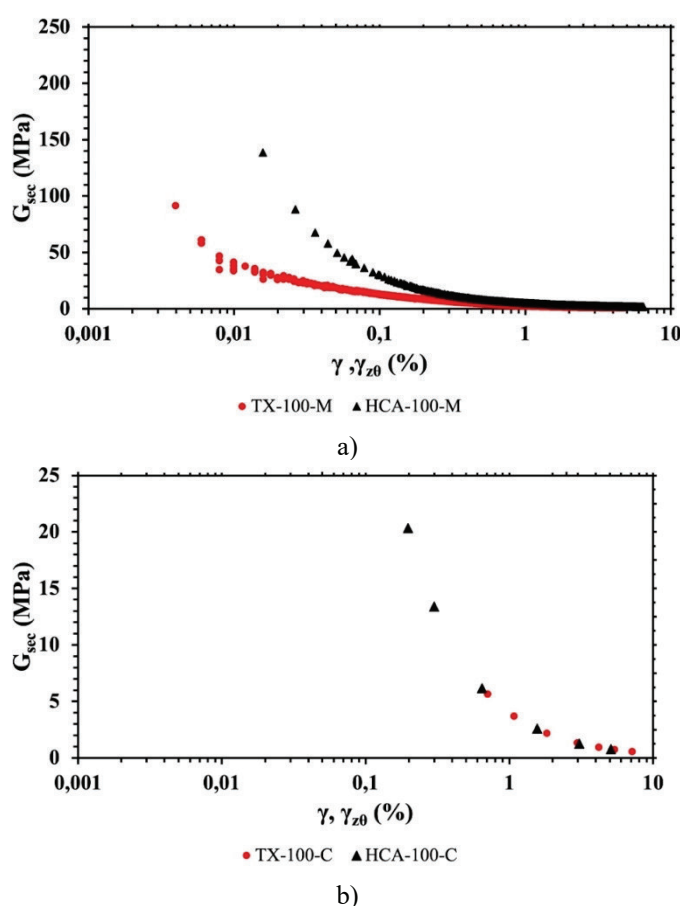


Fig. 13 – Influência do modo de carregamento: a) ensaios monotónicos; b) ensaios cíclicos.

Nos ensaios de corte cíclico (Figura 13b) não se observa a diferença de rigidez de corte encontrada nos ensaios monotónicos, ainda que para os valores de extensão apresentados essa diferença nos ensaios monotónicos já seja também muito menos significativa. Face aos dados recolhidos pela instrumentação global em ambos os ensaios, existe uma boa convergência de resultados entre os dois modos de carregamento cíclico. Porém, importa referir que a largura do

primeiro ciclo histerético nos ensaios triaxiais é mais de três vezes superior ao ciclo histerético nos ensaios de torção, não sendo possível efetuar comparações para níveis mais baixos de deformação.

A análise da influência do tipo de carregamento (monotónico ou cíclico) na degradação do módulo de rigidez de corte do rejeitado de mineração revela respostas diferentes em função do modo de corte. Nos ensaios triaxiais, os resultados apontam para um módulo secante algo superior nos ensaios cíclicos, quando comparados com os ensaios monotónicos (Figura 14a).

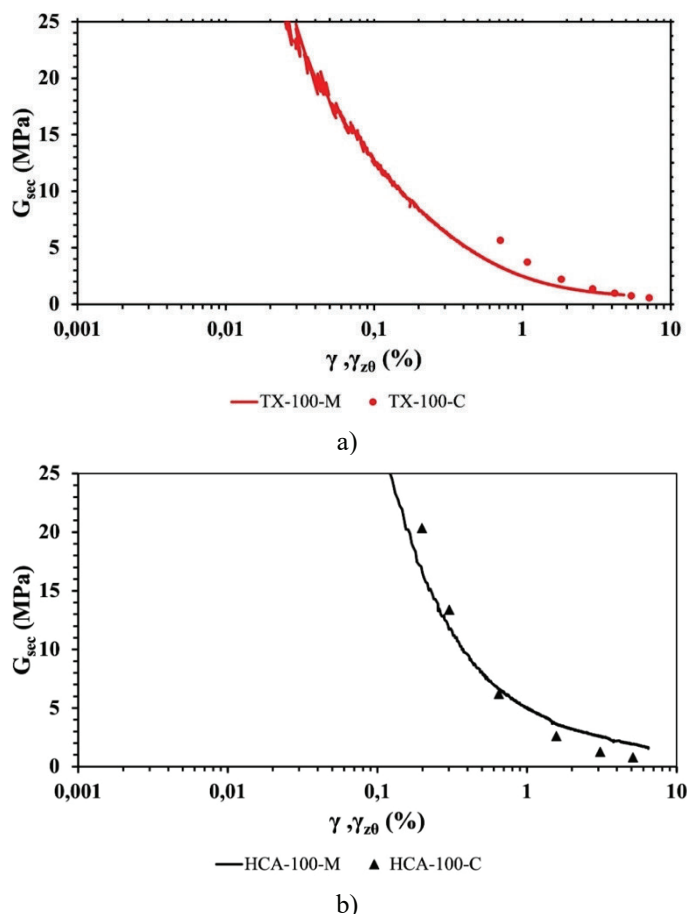


Fig. 14 – Influencia do tipo de carregamento: a) ensaios triaxiais; b) ensaios de torção simples.

Idênticas conclusões são apresentadas por Pan et al. (2022) no seu estudo realizado sobre argilas marinhas intactas e Teachavorasinskun et al. (2002) em argilas moles. Estes últimos autores referem que as diferenças observadas podem resultar das taxas de corte aplicadas, que podem estar na origem dessas diferenças. Porém, no presente estudo, as taxas de corte foram as mesmas em todos os ensaios. A tendência anteriormente identificada não se verifica nos ensaios de torção simples (Figura 14b). Para este tipo de carregamento, existe uma razoável concordância entre os resultados obtidos nos ensaios monotónicos e cíclicos. Atribui-se a diferença de comportamento à influência da tensão principal intermédia na resposta das amostras. De facto, nos ensaios de torção, o fator da tensão principal intermédia é constante e igual a 0,5, qualquer que seja o sentido de corte. Por sua vez, nos ensaios triaxiais, este parâmetro varia entre 0 (trajetórias de compressão) e 1 (trajetórias de extensão). Ou seja, nos ensaios cíclicos, verificam-se constantes rotações das tensões principais a cada meio ciclo.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A resposta de rejeitados de mineração a ações generalizadas requer o recurso a vários tipos de ensaios que permitam impor modos e tipos de corte diferentes. Nesse sentido, o HCA revela ser, do ponto de vista teórico, uma ferramenta experimental adequada para o estudo destes geomateriais passíveis de sofrerem liquefação induzida por sismos, nomeadamente por ser capaz de aplicar solicitações cíclicas às amostras que se aproximam mais da solicitação induzida por ações sísmicas *in situ*. Além disso, a sua grande versatilidade, bem como o elevado controlo permitido sobre todas as componentes do equipamento, permitem estudar trajetórias de tensões mais diversificadas e, frequentemente, mais realistas, permitindo inferir sobre a influência de parâmetros que, nos equipamentos convencionais, seria difícil ou até impossível determinar.

A preparação de amostras cilíndricas, sobretudo, mas não só, quando ocas, de rejeitados da mineração, através da técnica de deposição de pastas, apresenta um desafio com alguma complexidade. Para fazer face a essas dificuldades, desenvolveram-se metodologias que permitem a preparação de amostras consistentemente uniformes e homogêneas. Realça-se, igualmente, a importância da verificação da calibração de todos os instrumentos de leitura. Como se demonstra, as informações registadas podem originar uma interpretação errónea da resposta mecânica.

A investigação laboratorial corrobora e identifica aspetos fundamentais do comportamento de rejeitados de mineração de volfrâmio, que podem ser eventualmente generalizados a geomateriais semelhantes:

- À semelhança do que acontece em materiais granulares em condições não drenadas, e qualquer que seja o modo de corte monotónico considerado, os rejeitados contraem até atingirem o estado de transformação de fase. A partir deste instante, o material apresenta uma resposta dilatante, mantendo esta tendência até, eventualmente, atingir o estado crítico.
- Quando submetidos a cargas cíclicas, verifica-se um decréscimo gradual do estado de tensão efetiva, que conduz à ocorrência de liquefação por mobilidade cíclica.
- Para os dois modos de corte cíclico considerados, verifica-se uma simetria do comportamento tensão-deformação, contrariando o observado em estudos anteriores, tanto sobre rejeitados como em materiais granulares, que apontam para uma acumulação de deformação em trajetórias de extensão em ensaios triaxiais cíclicos.

A comparação da resposta mecânica deste geomaterial a ações generalizadas realça ainda a influência que o modo e o tipo de corte têm na geração de pressões intersticiais em condições de carregamento não drenado:

- Após atingir o estado de transformação de fase, a geração de acréscimos negativos de pressão intersticial é muito mais significativa nos ensaios de torção do que nos ensaios de compressão axial, conduzindo a tensões de corte superiores no primeiro modo de corte.
- Quando submetido a cargas cíclicas, verifica-se uma geração cíclica e positiva de pressão intersticial, sendo esta geração superior no primeiro ciclo e mais reduzida nos subsequentes.
- Após ocorrência de liquefação por mobilidade cíclica, a geração de pressões intersticiais é dependente do modo de corte. Nos ensaios cíclicos triaxiais, verifica-se uma concentração dessa geração nas trajetórias de extensão, a qual supera largamente a acumulada nas trajetórias de compressão, devido ao efeito da tensão principal intermédia, que nos ensaios de extensão coincide com a tensão principal máxima, enquanto nos ensaios de compressão coincide com a tensão principal mínima, ocorrendo uma rotação brusca das tensões principais entre estas fases de corte. Já nos ensaios de torção, esta geração é simétrica e tem valores independentes da direção de solicitação, ocorrendo uma variação gradual das direções principais.

- À semelhança do observado em estudos anteriores, em nenhum dos dois modos de carregamento se verificou a anulação total das tensões efetivas, observando-se uma razão de pressões intersticiais máxima de 0,95.

As conclusões anteriores apontam para o efeito que a tensão principal intermédia tem na resposta mecânica dos rejeitados de mineração de volfrâmio. De facto, nos ensaios de torção, o fator da tensão principal intermédia é constante e igual a 0,5, qualquer que seja o sentido de corte. Por sua vez, nos ensaios triaxiais, este parâmetro varia entre 0 (trajetórias de compressão) e 1 (trajetórias de extensão). Esta dedução é complementada pela análise e comparação da degradação do módulo de rigidez secante nos quatro ensaios efetuados:

- A degradação da rigidez de corte em função do aumento da deformação revela existir um comportamento mais rígido nos ensaios de torção do que nos ensaios de corte axial. O comportamento observado deve-se ao efeito da tensão principal intermédia na resposta dos solos aos carregamentos aplicados.
- Nos ensaios triaxiais, os resultados apontam para um módulo de distorção secante cíclico superior ao monotónico, corroborando estudos anteriores. Já nos ensaios de torção, existe uma razoável concordância entre a evolução dos dois módulos de distorção secante. Sendo a taxa de corte igual, atribui-se a diferença de comportamento à influência da tensão principal intermédia na resposta das amostras.

Os resultados apresentados reforçam a importância da utilização de modos de solicitação em laboratório que sejam tão próximos quanto possível dos presentes *in situ*, uma vez que o comportamento dos materiais é, em geral, bastante dependente do modo de solicitação.

7 – AGRADECIMENTOS

O trabalho de investigação apresentado neste trabalho enquadra-se no Projeto de Investigação GeoSusTailing – “Geotechnics for Safe and Sustainable Mine Tailings Management”, financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia- e tendo a referência PTDC/ECI-EGC/4147/2021.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agurto-Detzel, H.; Bianchi, M.; Assumpção, M.; Schimmel, M.; Collaço, B.; Ciardelli, C.; Barbosa, J. R.; Calhau, J. (2016). *The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence*. Geophys. Res. Lett., 43 (10), pp. 4929–4936. <https://doi.org/10.1002/2016GL069257>
- Antunes, S. M. P. B. (2010) *Levantamento do estado de contaminação da Barragem de Lamas e escombreira da mina da Panasqueira*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Araújo Santos, L. (2015). *Caracterização do Comportamento Mecânico da Areia de Coimbra sob Ações Generalizadas*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- ASTM (2006). D 2487 – *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. American Society for Testing and Materials, USA.
- Atkinson, J. H. (2000). *Non-linear stiffness in routine design*. Géotechnique, 50(5), 4, pp. 87–508.
- Ávila, P. F.; Silva, E. F.; Salgueiro, A. R.; Farinha, J. A. (2008). *Geochemistry and mineralogy of mill tailings impoundments from the Panasqueira Mine (Portugal): implications for the surrounding environment*. Mine Water and the Environment 27(3), pp. 210-224. <https://doi.org/10.1007/s10230-008-0046-4>

- Bishop, A. W.; Wesley, L. D. (1975). *Hydraulic Triaxial Apparatus for Controlled Stress Path Testing*. Géotechnique, 25, pp. 657–670. <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.4.657>
- BS 1377 (1975). *Methods of Test for Soil for Civil Engineering Purposes*. British Standards, London. British Standard Institution, Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes.
- Burland, J. B. (1989). “*Small is beautiful*” – the stiffness of soils at small strains. The ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture. Canadian Geotechnical Journal, 26 (4): pp. 499-516.
- Carneiro, J. J. V.; Marques, E. A. G.; da Fonseca, A. J. P. V.; Ferraz, R. L.; Oliveira, Â. H. C. (2023). *Characterization of an Iron Ore Tailing Sample and the Evaluation of Its Representativeness*. Geotechnical and Geological Engineering 41(7), pp. 2833-2852. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02430-8>
- Carraro, J.; Prezzi, M. (2008). *A New Slurry-Based Method of Preparation of Specimens of Sand Containing Fines*. Geotechnical Testing Journal, 31 (1), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1520/GTJ100207>
- Chern, J. C. (1985). *Undrained response of saturated sands with emphasis on liquefaction and cyclic mobility*. Tese de Doutorado, University of British Columbia, Vancouver.
- Coelho, P.; Camacho, D. (2024). *The Experimental Characterization of Iron Ore Tailings from a Geotechnical Perspective*. Applied Sciences, 14(12), 5033. <https://doi.org/10.3390/app14125033>
- Dominguez-Quintans, C.; Carraro, J. A. H.; Zdravkovic, L. (2023). *A Critical Assessment of the Effect of Initial Fabric on Key Small-Strain Design Parameters of Slurry-Deposited Silts and Sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 149(7), pp. 04023047. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11305>
- Dos Santos, R. A.; Vulpe, C.; Fourie, A.; Jefferies, M.; Silva, J. P. S.; Toé, M. D. (2025). *Shear wave velocity and small-strain stiffness across a broad range of states in iron tailings*. Canadian Geotechnical Journal 62. <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0751>
- Fanni, R.; Reid, D.; Fourie, A. (2024). *Effect of principal stress direction on the instability of sand under the constant shear drained stress path*. Géotechnique 74(9), pp. 875-891. <https://doi.org/10.1680/jgeot.22.00062>
- Fanni, R.; Reid, D.; Fourie, A. (2025). *Drained and undrained behaviour of a sandy silt gold tailings under general multiaxial conditions*. Géotechnique, pp. 1-20. <https://doi.org/10.1680/jgeot.23.00186>
- Fourie, A.; Reid, D.; Ayala, J.; Russell, A.; Vo, T.; Rahman, M.; Vinod, J. (2021). *Improvements in Estimating Strengths of Loose Tailings: Results from the TAILLIQ Research Project*. Proc. Mine Waste and Tailings, pp. 207–217. AusIMM.
- Gasparre, A. (2005). *Advanced laboratory characterization of London clay*. Tese de Doutorado, Imperial College London, Londres, Reino Unido.
- Hu, L.; Wu, H.; Zhang, L.; Zhang, P.; Wen, Q. (2016). *Geotechnical Properties of Mine Tailings*. Journal of Materials in Civil Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001736](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001736)
- Ishihara, K.; Towhata, I.; Yamazaki, A. (1985). *Sand liquefaction under rotation of principal stress axes*. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 1015-1018, San Francisco, USA.

- Islam, S. (2021). *A Study on the Mechanical Behaviour of Three Different Fine-Grained Mine Tailings*. Journal of King Saud University - Engineering Sciences.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. 1.^a Edição, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kuerbis, R. H.; Negussey, D.; Vaid, Y. P. (1988). *Effect of Gradation and Fines Content on the Undrained Response of Sand*. ASCE conference on hydraulic fill structures. Geotechnical Special Publication, 21, pp. 330–345. <https://dx.doi.org/10.14288/1.0062832>
- LNec (1965). NP-83 – *Solos: Determinação da densidade das partículas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal.
- LNec (1966). Especificação E 196-1966 – *Solos: Análise granulométrica*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- LNec (1969). NP-143 – *Solos: Determinação dos limites de consistência*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal.
- Luong, M. P.; Sidaner, J. F. (1981). *Undrained behaviour of cohesionless soils under cyclic and transient loading*. 1st International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp. 215-220, St. Louis, USA.
- Macedo, J.; Vergaray, L. (2022). *Properties of mine tailings for static liquefaction assessment*. Canadian Geotechnical Journal 59(5), pp. 667-687. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0600>
- Malekzadeh, M.; Lovisa, J.; Sivakugan, N. (2015). *Consolidation of Cannington Mine Tailing at Its Liquid Limit*. 12th Australia - New Zealand Conference on Geomechanics, Wellington, New Zealand.
- Minh, N. A. (2006). *An investigation of the anisotropic stress-strain-strength characteristics of an Eocene clay*. Tese de Doutoramento, Imperial College London, Londres, UK.
- Neiva, A. M. R. (2008). *Geochemistry of Cassiterite and Wolframite from Tin and Tungsten Quartz Veins in Portugal*. Ore Geology Reviews, pp. 221–238. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.013>
- Oliveira, J. P.; Araújo Santos, L.; Ribeiro, J.; Coelho, P.; Pedro, A. M. G. (2024a). *Influence of Environmental Conditions on the Behaviour of Tailings from Tungsten Mining for Sustainable Geotechnical Applications and Storage*. Sustainability, 16(24), 10987. <https://doi.org/10.3390/su162410987>
- Oliveira, J. P.; Coelho, P.; Araújo Santos, L. (2024b). *Application of the slurry deposition method to the reconstitution of samples of wolframite ore tailings*. XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 1860-1863, Lisboa, Portugal. <https://doi.org/10.1201/9781003431749-348>
- Pan, K.; Yuan, Z. H.; Zhao, C. F.; Tong, J. H.; Yang, Z. X. (2022). *Undrained shear and stiffness degradation of intact marine clay under monotonic and cyclic loading*. Engineering Geology 297, 106502. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106502>
- Raposo, Nuno Pereira. (2016). *Deposição de rejeitados espessados. Caracterização experimental e modelação numérica*. Tese de Doutoramento da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto, Portugal. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/86809>
- Rascol, É. (2009). *Cyclic properties of sand: dynamic behaviour for seismic applications*. Tese de Doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.

- Rico, M.; Benito, G.; Salgueiro, A. R.; Díez-Herrero, A.; Pereira, H. G. (2007). *Reported tailings dam failures- A review of the European incidents in the worldwide context*. Journal of Hazardous Materials, 152 (2), pp. 846–852. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>
- Robertson, P. K.; de Melo, L.; Williams, D. J.; Wilson, G. W. (2019). *Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I* (Investigation report commissioned by Vale S.A).
- Rodríguez, R.; Muñoz-Moreno, A.; Caparrós, V. A. (2021). *How to Prevent Flow Failures in Tailings Dams*. Mine Water Environ, pp. 83–112. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00752-8>
- Schnaid, F.; Bedin, J.; Viana da Fonseca, A. J. P.; Moura Costa Filho, L. (2013). *Stiffness and strength governing the static liquefaction of tailings*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 139 (12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000924](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000924)
- Seed, H. B.; Lee, K. L. (1965). *Studies of the liquefaction of sands under cyclic loading conditions*. Soil Mechanics and Bituminous Materials Laboratory, University of California. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000913>
- Simão, F. C. S. V. (2017). *Avaliação do potencial em metais críticos nas células de lamas da Mina da Panasqueira (Barroca Grande, Portugal)*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Solans, D.; Kontoe, S.; Zdravkovic, L. (2019). *Monotonic and cyclic response of tailings sands*. Conference Earthquake risk and engineering towards a resilient world. Greenwich, London. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11898-2_181
- Suazo, G.; Fourie, A.; Doherty, J.; Hasan, A. (2016). *Effects of confining stress, density and initial static shear stress on the cyclic shear response of fine-grained unclassified tailings*. Géotechnique, 66 (5), pp. 401–412. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.032>
- Symes, M. J. P. R. (1983). *Rotation of principal stresses in sand*. Tese de Doutoramento, Imperial College London, Londres, Reino Unido.
- Teachavorasinskun, S.; Thongchim, P.; Lukkunaprasit, P. (2002). *Stress rate effect on the stiffness of a soft clay from cyclic, compression and extension triaxial tests*. Géotechnique 52 (1), pp. 51-54. <https://doi.org/10.1680/geot.2002.52.1.51>
- USAID (2021). *Mining and the Green Energy Transition: International Development Challenges and Opportunities*. USAID Industry Lead for Mining. Burlington. USA. USCOLD (1994): *Tailings Dam Incidents*, U.S. Committee on Large Dams (USCOLD), Denver, Colorado, USA.
- Venda Oliveira, P. J. (1992). *Algumas características do comportamento de um solo de baixa plasticidade*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Viana da Fonseca, A.; Santos, J.; Coelho, P. A. L. F. (2021). *30 anos de progresso em 3 laboratórios de geotecnia de universidades portuguesas: caracterização de solos não plásticos*. Geotecnia 152, pp. 143-185. https://doi.org/10.14195/2184-8394_152_5
- Wang, R.; Zeng, F.; Li, L. (2021). *Applicability of Constitutive Models to Describing the Compressibility of Mining Backfill: A Comparative Study*. Processes, 2021 (9), 2139. <https://doi.org/10.3390/pr9122139>
- Witte, A.; Ekman, K.; Diaz, C. (2017). *Mine Environment Neutral Drainage Project*. MEND Report 2.50.1 Study of Tailings Management Technologies. Kloth Crippen Berger.