

30 ANOS DE PROGRESSO EM 3 LABORATÓRIOS DE GEOTECNIA DE UNIVERSIDADES PORTUGUESAS: CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS NÃO PLÁSTICOS

30 years of progress in 3 geotechnical labs of Portuguese universities: characterisation of non-plastic soils

António Viana da Fonseca^a, Jaime Santos^b, Paulo Coelho^c

^a CONSTRUCT-GEO – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

^b CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

^c Universidade de Coimbra, CITTA, Dep. de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal

RESUMO – Os 3 Laboratórios de Geotecnia dos Departamentos de Engenharia Civil das Universidades do Porto, de Lisboa e de Coimbra, tiveram um desenvolvimento notável ao longo dos últimos 30 anos relativamente às valências em equipamento e metodologia de ensaios na vertente da Mecânica dos Solos. Este artigo retrata essa evolução, na perspetiva da caracterização do comportamento mecânico de solos não plásticos, destacando a matriz preferencial das competências laboratoriais focadas no ensino e investigação avançados e que potenciaram intensas colaborações que se traduziram em várias dissertações de doutoramento e mestrado comuns e em diversos projetos de investigação conjuntos. Inicialmente, cada Instituição descreve alguns dos equipamentos e das técnicas experimentais que adquiriu e/ou desenvolveu localmente para a caracterização experimental avançada do comportamento de solos não plásticos sob diferentes tipos de sollicitação e níveis de deformação. Alguns resultados experimentais obtidos considerados relevantes ilustram o contributo dos Laboratórios para o progresso do conhecimento neste campo. Posteriormente, o artigo descreve alguns resultados de investigação colaborativa entre as 3 Instituições onde a combinação de técnicas e equipamentos de ensaio complementares permitiu a caracterização de aspetos relevantes da Areia de Coimbra.

ABSTRACT – The 3 Geotechnical Labs of the Civil Engineering Departments of Porto, Lisbon and Coimbra Universities, had a remarkable development during the last 30 years with respect to the equipment and testing methods in Soil Mechanics. The paper depicts this evolution from the perspective of the characterisation of the mechanical behaviour of non-plastic soils, highlighting the emphasis of the experimental facilities on advanced teaching and research that underpinned solid collaborations that resulted in various joint MSc and PhD thesis and collaborative research projects. Firstly, each Institution describes some equipment and experimental techniques acquired and/or developed locally for the advanced experimental characterisation of the behaviour of non-plastic soils under different loading conditions and varying strain levels. Some relevant experimental results obtained highlight the contribution of the Laboratories for the progress of the knowledge in this field. Next, the paper describes some results obtained through collaborative research involving the 3 Institutions where the combination of distinct testing techniques and equipment enabled the characterisation of relevant aspects of Coimbra sand.

Palavras Chave – Laboratório de geotecnia, solos granulares, equipamento e métodos avançados, projeto e análise

Keywords – Geotechnical laboratory, granular soils, advanced equipment and methods, design and analysis

E-mails: viana@fe.up.pt (A.V. Fonseca), jaime.santos@tecnico.ulisboa.pt (J. Santos), pac@dec.uc.pt (P. Coelho)

ORCID: orcid.org/0000-0002-9896-1410, orcid.org/0000-0003-4231-5687, orcid.org/0000-0001-6078-0393

1 – INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

Na sequência do objetivo descrito no resumo, neste trabalho procurou-se não repetir entre as três seções correspondentes, associadas aos laboratórios de geotecnia da FEUP, IST e FCTUC, equipamentos e métodos para se dar uma visão mais abrangente das capacidades instaladas, embora se interliguem muitos dos ensaios que são contextualizados para propósitos do projeto e análise de comportamento de estruturas geotécnicas. A matriz preferencial destas competências laboratoriais é o ensino superior e a investigação avançada, pelo que ao longo destes anos de colaborações entre os grupos que trabalham neles, foram concluídas dissertações de doutoramento e mestrado e projetos de investigação conjuntos. A marca de cada laboratório foi acordada entre os responsáveis para que se relevasse algum(ns) tópicos e metodologias que se considerasse importante na engenharia geotécnica do presente e próximo futuro. Assim, numa das seções dá-se particular relevo a técnicas de instrumentação inovadoras e métodos de preparação, condicionamento e ensaios mecânicos em trajetórias convencionais monotónicas ou cíclicas em câmaras triaxiais clássicas, com propósitos de identificar com rigor estados limites de serviço e últimos (rigidez de muito pequenas a muito altas deformações, condições de estados instáveis – amolecimento e/ou liquefação em carregamentos não drenado – e últimos – estados críticos. Descreve-se sucintamente as valências dos ensaios de corte simples e corte direto simples, tanto estáticos como cíclicos, dada a relevância da trajetória imposta para estudos de estabilidade. Na secção subsequente faz-se uma apresentação sintética dos meios disponíveis para a caracterização dinâmica e cíclica destes solos, com recurso a equipamento que permite a avaliação do módulo de distorção e do coeficiente de amortecimento histerético dos solos, como a coluna ressonante e o ensaio de torção cíclica. Na última secção, são apresentados outros equipamentos avançados, as células de caminhos de tensões, o aparelho de coluna ôca (HCA), combinados com equipamentos para instrumentação interna e medição da velocidade de propagação de ondas e sistemas de controlo e aquisição automáticos de dados e preparação de amostras.

2 – CONTRIBUIÇÃO DO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DA FEUP

2.1 – Breve nota sobre a evolução de procedimentos

O Laboratório de Geotecnia da FEUP (LabGeo) foi criado de raiz no final da década de 80 tendo crescido paulatinamente em equipamentos para ensaios geotécnicos mais especializados e inovando em processos e metodologias a dois níveis, ensaios in situ (é disso exemplo a introdução do primeiro CPTU na década de 90 – Viana da Fonseca, 1994, Viana da Fonseca, 2007) e ensaios laboratoriais (Viana da Fonseca et al., 1994, Viana da Fonseca, 1995, 1996, 1998). Nos pontos que seguem serão descritos brevemente algumas das valências em ensaios mecânicos em laboratório em solos granulares (excluído agregados para infraestruturas de transporte) e como os sistemas foram sendo completados e melhorados no decurso destes mais de 30 anos de trabalho continuado (Figura 1).



Fig. 1 – Triaxiais para agregados, solos não saturados e stress-path (www.fe.up.pt/labgeo)

2.2 – Ensaios triaxiais convencionais

2.2.1 – Equipamentos e procedimentos avançados para novos desafios

Os ensaios triaxiais estáticos foram sempre considerados prioritários no laboratório de geotecnia da FEUP na identificação das propriedades hidráulicas e geomecânicas dos solos para definição de parâmetros em análises do comportamento de obras de terra (aterros, barragens, etc.) ou de maciços interagindo com estruturas, tais como fundações (de edifícios ou aterros), escavações e contenções periféricas, obras subterrâneas e outras. Tal enquadrando-se num grande número de trabalhos de investigação, com relevo para teses de doutoramento (Viana da Fonseca, 1996, Ferreira 2008, Cruz, 2008, Topa Gomes, 2009, Bedin, 2010, Rios, 2011, Dourado, 2012, Amaral, 2012, Guedes, 2013, Esteves, 2013, Laranjo, 2013, Soares, 2014, Motta, 2016, Raposo, 2016, Panico, 2018, Delgado, 2019, Ramos, 2021). Muitos destes trabalhos de investigação incidiram sobre solos residuais – proficuos no Centro e Norte de Portugal -, solos sedimentares de aluviões e eluviões do território nacional e Brasileiro, materiais granulares para infraestruturas de transportes, rejeitos silto-arenosos de mineração e outros, consequência de trabalhos de extensão, fruto da visibilidade atida a partir de um volume significativo de publicações. Estas e muitas teses de mestrado seriam enquadradas em projetos (FCT, ANI, com empresa de construção e projetos internacionais, salientando-se o recente projeto europeu Liquefact (www.liquefact.eu). Muito incidiriam particularmente em estudos de instabilidade de solos granulares (arenosos, siltosos e com cascalho), associados à liquefação por fluxo (estática), com ênfase para rejeitos de mineração, ou cíclica, em particular de origem sísmica.

Para além de terem sido estudados muito solos amostrados em condições indeformadas, foram também otimizados processos de reconstituição dos solos para índices de vazios próximos das condições de estado em jazida (solos soltos a muito soltos e liquidificáveis), com o objetivo de obter uma melhor caracterização da linha dos estados críticos, que foi definida com alguma incerteza em vários trabalhos de Mestrado Integrado em Engenharia Civil – ramo Geotecnia - da FEUP. Valores do índice de vazios mais baixos, não denunciando potencial de liquefação estática, podem sê-lo em carregamento cíclicos de grande intensidade, pelo que se estudou de forma sistemática a mobilidade cíclica, para bom reconhecimento das consequências das ações sísmica. Os estudos de suscetibilidade e perigo (hazard) obrigaram à caracterização do comportamento dos lados húmido (solto) e seco (denso) das superfícies associadas aos estados críticos (no espaço de invariantes de tensão e de variação volumétrica, definidos por linhas de estado crítico, LEC ou CSL, na literatura anglo-saxónica) para definir os parâmetros necessários aos modelos constitutivos que simulam assertivamente as repostas dos maciços terrosos. Complementarmente aos ensaios estáticos, para definir a linha de consolidação em condições confinadas, teoricamente paralela à linha dos estados críticos, realizaram-se sempre ensaios mais simples como consolidómetros e ensaios de corte direto e simples estático (simple shear, SS). Dada a relevância da rotação das tensões principais em carregamentos monotónicos e cíclicos, fez-se um novo investimento num sistema cíclico (CSS).

A evolução crescente, nos últimos anos, da atividade do laboratório para responder aos projetos de investigação e crescentes solicitações da indústria de mineração para caracterização e parametrização de materiais finos rejeitados do processos de mineração (de proveniência nacional e internacional e minérios tão distintos como bauxite, cobre, ferro, ouro, zinco, etc) numa perspectiva de modelação constitutiva para análise avançadas (numéricas) da estabilidade de barragens e pilhas de grande dimensão, levou a um significativo de esforço de modernização de equipamento, técnicas, metodologias de ensaios e interpretação que cobririam gamas de deformação de muito baixas deformações (rigidez elástica e dinâmicas) a muito grandes (comportamento de amolecimento pós-pico, com transformação de fase ou instabilização, para resistências residuais, baixas a nulas).

Das diferentes técnicas (desde os electro-inclinómetros pendulares do Imperial College aos transdutores de bandas metálicas - bronze fosfórico - extensiométradas, LTD - das equipas de investigação da Universidade de Tóquio, passando por transdutores de proximidade da Universidade de Surrey) que foram vindo a ser sido apontadas como vantajosas em alguns aspetos, todas foram

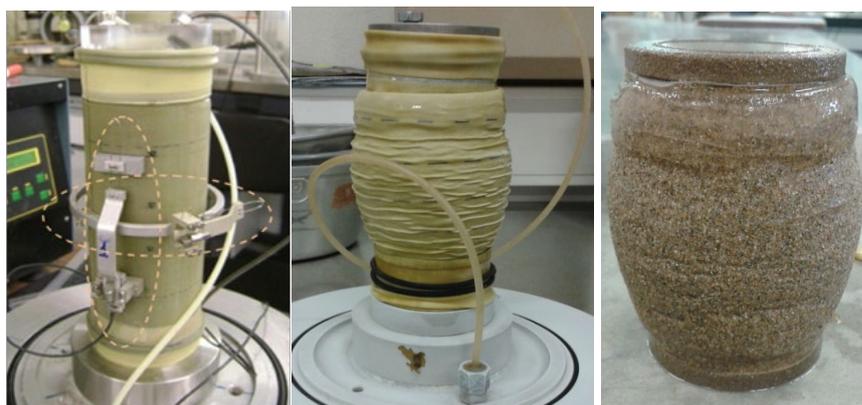


Fig. 3 – Transdutores Hall para instrumentação local e congelamento dos provetes pós-rotura para avaliação do índice de vazios final e definição da Linha do Estados Críticos em solos.

deposição na natureza (aluviões ou eluviões) ou antrópica, como é do caso, dos solos finos de rejeitos de mineração dispostos em húmido espigotados ou depositados em lâmina de água.

Para tal, os métodos mais usados têm sido a deposição em húmido “slurry”, a seco (“dry pluviation”) ou com leve apiloamento (“moist tamping”) por camada com teores em água otimizados para que estes provetes possam moldar-se soltos (índices de vazios muito elevados), mas estáveis, acima do índice de vazios máximo (geralmente determinado por via seca). Assim preparados, procede-se ao adensamento/consolidação em células edométricas (convencionais ou de carregamento contínuo, CRD, CRA, ou HCT) e/ou em células triaxiais até níveis de tensão diversos que sejam relevantes para a obra ou estrutura geotécnica em apreço (aterros, barragens, pilhas, etc.).

Se os primeiros tipos de preparação podem ser considerados mais próximos das condições de deposição *in situ* (em obra), são, porém, difíceis de implementar diretamente em moldes desenhados para encaixarem na base e topo, com a membrana aderente às paredes interiores do molde, no caso da deposição em húmido, por um lado, ou dificilmente garantem condições “soltas” e muito menos “muito soltas” na preparação por pluviação seca (Viana da Fonseca et al. 2011).



Fig. 4 – Fases de montagem: a) ajuste da membrana ao molde; b) introdução de uma camada de areia; c) fase final da colocação da areia no molde (adapt. de Viana da Fonseca et al. 2021).

Por isso, a compactação húmida (“moist tamping”) foi escolhida (Figura 4) por ser capaz de produzir a mais ampla faixa na razão de vazios com uniformidade satisfatória, permitindo uma definição clara do CSL, já que os estados de elevada deformação que definem esta linha extrema, já são isentos de eventual fábrica (organização intra e interparticular) que seria induzida pelo apiloamento leve em camadas. Embora seja uma técnica muito popular pela sua versatilidade e estabilidade dos provetes sustentados por alguma sucção (fruto da água meniscal nos vazios), pode em ensaios cíclicos para verificação da suscetibilidade à liquefação de origem sísmica, criar um “tecido em favo de mel” que leva a uma maior suscetibilidade à liquefação (Ramos, 2021). Sendo uma técnica mais fácil de executar e eficiente na obtenção de índices de vazios desejados, se for

garantida a não segregação das partículas do solo (como pode acontecer na técnica de pluviação seca com funil seco), permite que o operador controle a densidade final muito mais prontamente.

Esta técnica de apiloamento suave de solo um pouco húmido, é descrita em vários trabalhos de dissertações de doutoramento e mestrado na FEUP, obriga a cuidadoso estudo do número de camadas a dispor e à consideração da necessidade de subcompactação (undercompaction) das primeiras (precedentes) camadas de solos apilado que deve ser calibrado previamente para classes diferenciadas de solos (este assunto é objeto de várias publicações, salientando-se o artigo recente de Viana da Fonseca et al., 2021).

Para além da fase de preparação acima descrita, a execução dos ensaios envolveu as seguintes etapas: (i) percolação dos provetes com água desaerada (assegurando-se sempre que o volume de água percolado fosse no mínimo o dobro do volume de vazios); introduziu-se com grande sucesso percolação prévia de CO₂ pela base do provete e que dada a sua densidade elimina com grande eficiência grande parte do ar livre nos poros; (ii) saturação plena da amostra, por aumento da contrapressão até à dissolução completa da fase gasosa, com elevadas pressões que podem oscilar entre 300 e 500kPa; (iii) consolidação contínua e gradativa, isotrópica ou anisotrópica que permitem a simulação das condições desejadas de consolidação; (iv) carregamento distorcional tanto em condições estáticas como cíclicas, em condições drenadas e não drenadas.

2.2.3 – Ajustes em câmaras triaxiais para definição da linha de estados críticos

Os procedimentos recomendados para avaliar Linhas de Estado Crítico (LEC ou CSL) num artigo recentemente publicado (Viana da Fonseca et al., 2021) reforçam, com resultados comparados, a grande vantagem do uso de células triaxiais com bases e topos dos provetes lubrificados e um pistão de acionamento da carga embutido naquele topo superior. De facto, juntamente com a verificação da condição de saturação total e da medição do teor de água no final do teste, os resultados para as CSL reportados no âmbito de um programa “round robin” liderado pela Univ. Western of Australia (Reid et al., 2020) mostram que há fiabilidade e reprodutibilidade dos procedimentos seguidos por alguns dos laboratórios de referência que foram convidados, incluindo o LabGeo da FEUP. Comparações entre diferentes configurações de equipamentos triaxiais confirmaram que as extremidades lubrificadas reduzem o atrito mobilizado durante o ensaio, conferindo um comportamento de tensão-deformação uniforme, variação de volume confiável e resposta de pressões neutras regulares, proporcionando uma melhor definição dos pontos de instabilidade dos solos liquidificáveis e a própria LEC.

As extremidades lubrificadas têm uma placa rígida e lisa e dois discos de membrana triaxial de látex padrão com massa de silicone entre dois discos de látex e as superfícies metálicas. O uso de um pistão embutido evita a inclinação das amostras, resultando em tensões de desvio uniformes, evitando a geração de superfícies (bandas) de corte durante o ensaio triaxial em solos de contração e induzindo mais significativa contração volumétrica. A Figura 5 ilustra estes melhoramentos.

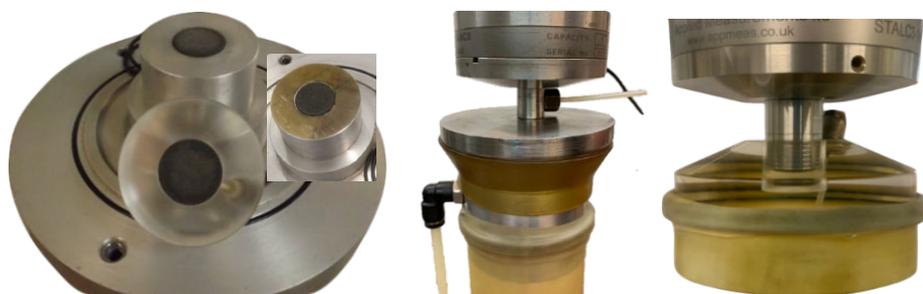


Fig. 5 – a) Placas de extremidade lubrificadas; b) Conexão da célula de carga ao topo com manga de sucção e a pistão de carregamento encastrado na tampa superior incorporada.

A Figura 6-a apresenta uma comparação entre as trajetórias de variação do índice de vazios e a tensão média efetiva no decurso de ensaios drenados, definindo no seu limite a LEC neste espaço de compressibilidade. Pode-se observar que as trajetórias obtidas pelo procedimento convencional e pelo inovador têm a mesma forma, provando a representatividade dos dois conjuntos de provetes e a consistência do método de reconstituição. No entanto, as trajetórias finalizam em pontos diferentes afetando a posição e a inclinação da LEC, resultando em projetos e análises de estruturas geotécnicas mais seguros. Na Figura 6-b apresentam-se comparações diretas entre ensaios em que o carregamento se faz com pistão não guiado e o mesmo garantido com a nova técnica.

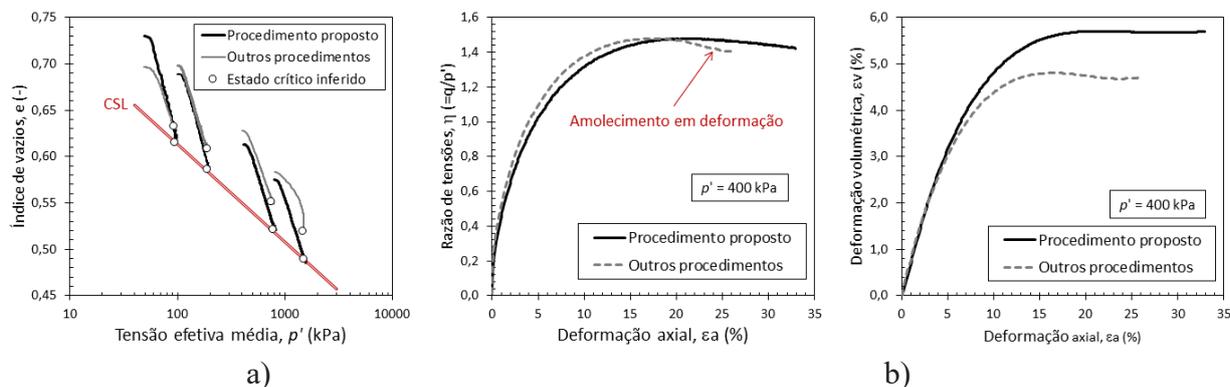


Fig. 6 – Comparação de resultados entre ensaios emparelhados sem e com guiamento do pistão; a) LEC em trajetórias de dois conjuntos de ensaios; b) trajetórias de tensão-deformação

2.3 – Transdutores piezoelétricos para avaliação de velocidades de ondas primárias (S e P)

No laboratório de geotecnia da FEUP, estes transdutores foram introduzidos em 2000 (manufaturados pela Enel.Hydro S.p.A - B.U. ISMES, Bérghamo – Brignoli et al., 1996) evoluindo-se posteriormente (Ferreira e Viana da Fonseca, 2002) para sistemas manufaturados por universidades parceiras da FEUP em projetos de investigação, tais como a Universidade de Bristol (UoB), na pessoa do Prof. David Nash, em 2001 (Lings e Greening, 2001, Greening e Nash, 2004) e a University of Western Australia (UWA), na pessoa do Prof. Martin Fahey (Ismail et al. 2005).

Na Figura 7 apresentam-se fotos de transdutores provindos dos laboratórios das universidades parceiras. A manufatura implica o uso de ferramentas particulares e materiais, sendo necessários moldes específicos para a resina epóxida específica envolver o transdutor com finíssima e uniforme superfície de proteção, proporcionando isolamento e robustez adequados para o funcionamento continuada destes transdutores em condições agressivas, submerso sob pressões que podem atingir valores elevados (pormenores em Ferreira, 2009) e atuando sobre distintos tipos de partículas em forma, peso e mais ou mesmo cimentadas (também se usam em rochas – Arroyo et al., 2010).



Fig. 7 – Transdutores piezocerâmicos, ondas S e P: (a) bender elements (BE) e compression plates (ISMES); (b) bender-extender elements, BEE (UoB); (c) BE em T, hv e hh (UWA).

2.3.1 – As potencialidades dos Bender/Extenders Elements na experimentação em Geotecnia

A necessidade de ir instalando estes dispositivos (BE e BEE) em várias células triaxiais (bem como em edômetros hidráulicos e mais recentemente numa célula de ensaios de corte simples) seria resolvida com o fabrico no próprio LabGeo da FEUP destes transdutores (BE, BEE e BE_T), mais tarde fornecendo a outras universidades, no âmbito de projetos de investigação comuns.

São muitas as potencialidades destes transdutores para servir objetivos tão diversos como:

- a verificação da saturação em provetes de solos, condição determinante em certos processos de caracterização do comportamento dos solos, particularmente em carregamentos não drenados, sustentada pela velocidade da onda de compressão, assunto que será desenvolvido abaixo;

- a avaliação rigidez distorcional máxima que é determinável pela medição da velocidade das ondas correspondentes (V_s), que tem um valor de per si já que permite a determinação teórica de módulos de referência que viabilizam modelos no domínio da teoria de elasticidade ($G_{max}=G_{din}$) ou de porosidade ou índices de vazios em solos granulares submersos (Foti et al., 2002), acrescido de, em conjunto com V_p , a determinação do coeficiente de Poisson dos solos não saturados (inviável se os poros estiverem preenchido com água/líquido menos compressível do que do que as partículas entre si) ou solos cimentados natural ou artificialmente (Consoli et al., 2012, Amaral et al., 2011, 2013, Viana da Fonseca et al. 2013, Rios et al., 2017) e mesmo rochas (Arroyo et al. 2000).

- definição de anisotropia induzida (estado de tensão de repouso, Viana da Fonseca et al., 2005, ou trajetória de carregamento) e inerente (microfábrica e macrofábrica natural ou imposta, tal como analisado em Ferreira, 2009, Amaral, 2012 e Viana da Fonseca et al. 2013).

- avaliação da qualidade de amostras de solos indeformados (Ferreira et al. 2011, Viana da Fonseca et al. 2019a e b, Molina-Gómez et al. 2020); uma descrição completa das atividades que conduziram a estudos aprofundados dos desempenhos de alguns amostradores de referência pode ser vista em: <https://paginas.fe.up.pt/~sgwww/labgeo/liq2proearth/>

- suscetibilidade à liquefação por fluxo e cíclica em solos não plásticos, areias, siltes e mistos (ex. rejeitos finos de mineração), perigo - hazard (Viana da Fonseca et al, 2011, 2015, Bedin, 2012, Robertson et al. 2017) e evolução com o estado de tensão induzido (Schnaid et al., 2013, Soares, 2014, Soares e Viana da Fonseca, 2016); o índice de rigidez – um ratio entre a rigidez máxima (dinâmica) para muito baixas deformações) e a resistência distorcional (em particular, a resistência não drenada de pico) – é hoje reconhecido nuclear para avaliação da sensibilidade dos solos (“sensitivity” na literatura anglo-saxónica), seja para estudo de resistências residuais (em argila remoldadas, por ex.), ou resistências pós desestruturação (em solos cimentados), ou, resistência liquefeita em solos liquidificáveis de grande fragilidade (em rejeitos de mineração), pelo que veio ser particularmente estudado em trabalhos de investigação que se descrevem a seguir.

2.3.2 – Interpretação dos registos das ondas no domínio do tempo e da frequência, ondas de compressão para avaliação do grau de saturação

Uma das condições para que estes dispositivos sirvam os seus propósitos é de usar métodos de análise sem viés destes registos no tempo das ondas do BE recetor e conseguir identificar bem o tempo de propagação da onda através do provete, distinguindo-a claramente de espúrias que podem resultar de reflexões, refrações e de outros caminhos não representativos (como os que foram debatidos intensamente nas primeiras duas dezenas de anos deste século). Contribuindo para a solução deste assunto, e no âmbito de tese de doutoramento da investigadora Cristina Ferreira, seria publicado um método que se tornou referência (Viana da Fonseca et al., 2009) e que na sua essência consiste em fazer uma análise simultânea da coerência entre os sinais de entrada e saída no domínio do tempo (TD) em relação à frequência de entrada e um gráfico de tempo versus frequência deduzida dos dados de varredura. Ou seja, o uso combinado de métodos no domínio do tempo e da frequência (FD) podem ajudar efetivamente na análise e interpretação dos resultados de BE. Este processo ilustra-se na Figura 8 e na prática corrente pode ser aplicado de forma intuitiva. A saturação da

amostra pode ser feita medindo o valor do parâmetro “B” de pressão nos poros (neutra) definido por Skempton, como a razão dos incrementos da pressão nos poros (Δu) e pressão da célula ($\Delta \sigma_3 = \Delta \sigma_1$) aplicada sob condições não drenadas. Em condições totalmente saturadas, $\Delta \sigma_3 = \Delta u$ e o valor B é unitário. Na prática para solos granulares, um valor B superior a 0,97 é recomendado.

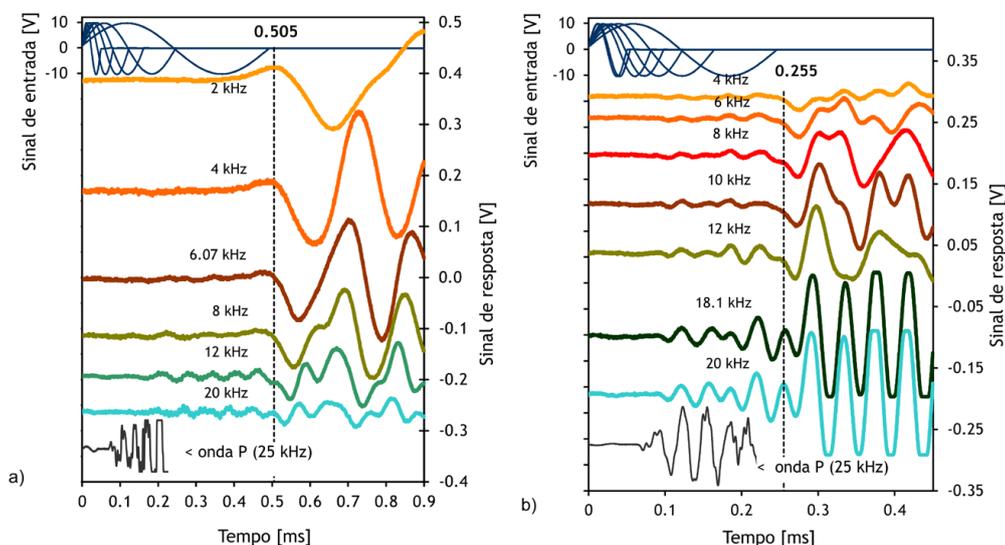


Fig. 8 – Resultados em TD para ondas sinusoidais de input num provete de solo (onda S em frequências de 2, 4, 6.07, 8, 12, 20 kHz e onda P, em 25 kHz): (a) $p' = 100$ kPa; (b) $p' = 800$ kPa.

No entanto, um valor B alto nem sempre garante a saturação total para todos os tipos de solos, o que é particularmente importante em ensaios não drenados realizados especificamente para a avaliação da suscetibilidade à liquefação (os valores da resistência variam significativamente para diferenças muito reduzidas de grau de saturação. Ora, a insuficiente garantia de diferenciar total saturação de saturação quase-total a partir dos valores de B (reconhece-se que o tempo de resposta pode ser assumido com critérios muito pessoais e, por isso, erróneos a estes níveis de exigência), uma correlação deste parâmetro com a velocidade da onda de compressão (V_p) pode de forma singular validar a condição de saturação completa do solo. Num artigo de Faria et al. (2005) nesta revista e num outro com solos de Maputo (Chembeze e Viana da Fonseca, 2008), os autores demonstram como se pode verificar, com recurso à medição de velocidades de ondas vibratórias de compressão (V_p) através dos provetes em fase de saturação/consolidação, por meio de transdutores piezoelétricos, se a “completa” saturação dos solos a estudar em ensaios triaxiais, pode ser assegurada exclusivamente com a avaliação do parâmetro de pressão neutra de Skempton: ($B = \Delta u / \Delta \sigma$, em que $\Delta \sigma$ é o incremento de pressão isotrópica e Δu o correspondente incremento da poropressão, neutra ou intersticial). Estes transdutores foram inicialmente desenvolvidos para atuarem em movimento transversal à direção de propagação das ondas que assim são essencialmente distorcionais ou de corte (“S” de *Shear*), sendo a velocidade de propagação um parâmetro essencial para a caracterização de rigidez dos materiais atravessados. No entanto, percebeu-se cedo das vantagens em procurar usar os piezo transdutores vibrando longitudinalmente para gerar ondas P, tendo surgido os extender elements, antes referidos. Porém, foi-se verificando - em particular no LabGeo da FEUP – que as mesmas palhetas que vibram transversalmente emitem sinais de ondas de compressão, em frequências mais elevadas do que as usadas para a emissão das ondas S.

Recentemente, num artigo de Ferreira et al. (2021) revisitou-se a importante valência de um sistema típico de bender elements (BE) poder viabilizar medições simultâneas de velocidades de onda de compressão (V_p) e de distorção/corte (V_s), sem necessidade de recorrer a transdutor com dois conjuntos de placas piezocerâmicas com polarização oposta, tipo bender-extender (Ling e Nash, 2001). Nesse trabalho apresenta-se uma nova abordagem para as medições simultâneas de

velocidades de onda de compressão (V_P) e de corte (V_S) usando um sistema BE típico baseado no uso de pulsos de excitação de baixa e alta frequência. O procedimento é demonstrado experimentalmente por medições de um vibrómetro com registos a laser de alta resolução para muito elevadas frequências, registando a deformação real do BE à escala nanométrica. As medições do laser (Figura 9) mostraram que a frequência de entrada afeta fortemente os deslocamentos induzidos do transmissor BE, não apenas na horizontal, mas também na vertical, identificando claramente a geração de ondas P quando para modos de vibração mais elevados. Os valores de V_P medidos estão em boa concordância com os valores previstos usando as equações de Biot com os valores de V_S medidos. A deteção da chegada da onda P é possível quando altas frequências são usadas porque estas excitam os BE em modos de vibração mais altos, conduzindo a movimentos mais significativos na direção longitudinal (vertical no caso do arranjo mais corrente na base e no topo de um provete vertical) do que em modos de vibração com frequências mais baixas. Criam-se, naquelas condições movimentos de compressão-extensão e, portanto, uma frente de onda P mais forte. Nos modos de vibração com frequências mais elevadas induzem-se menores deformações transversais (horizontais no layout corrente), pela baixa energia da componente S das ondas geradas pelo BE transmissor à medida sobe a frequência de excitação. Comprovou-se com a medição laser dos movimentos efetivos das palhetas piezo-cerâmicas que os mesmos são transversais para mais baixas frequência e longitudinais para mais altas frequências, fruto da propagação das ondas “S” e “P” geradas pelos BE transmissores e registos dos recetores. A metodologia seguida resolve lacunas de fundamentação física para a observação das mesmas a partir de registo das séries temporais recolhidas nos BE recetores, sendo os comprimentos de onda gerados suficientemente grandes para que se transmitam através das partículas em contacto, em vez da água nos interstícios (poros). Espera-se que esta evidência tenha reflexo em normas correspondentes.

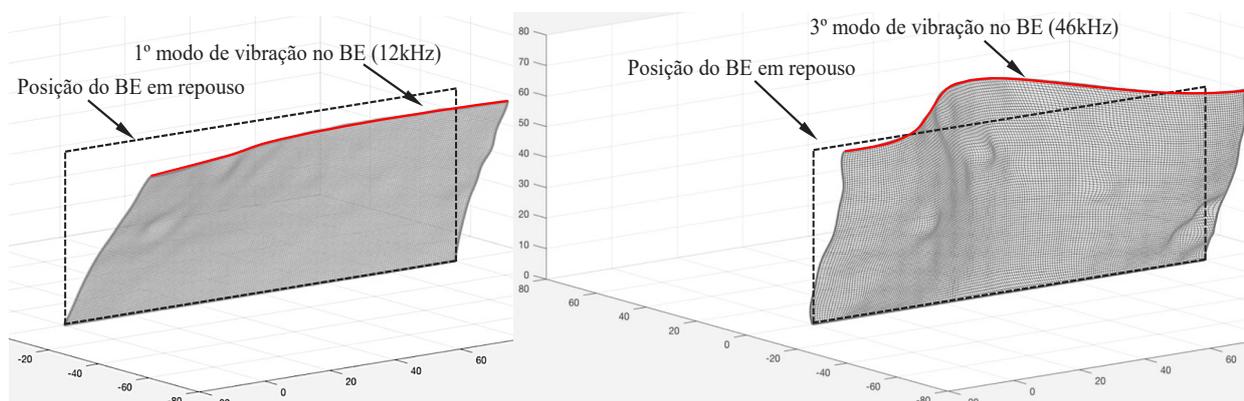


Fig. 9 – Imagem em 3D do 1º e 3º modo de vibração dos BE para deslocamentos horizontais (no ar) no topo e ao longo da sua extensão (adaptado de Diaz Duran, 2020).

Ainda que estes últimos trabalhos com medições muito precisas revelem a franca compatibilidade do movimento longitudinal das palhetas do “BE” em modos de vibração específicos (para determinadas frequências), importa que na interpretação que se faz dos registos de vibração no domínio do tempo para determinação tanto da V_S como da V_P , há que ter um claro controlo do efeito marginal de ondas secundárias que se propagam pelas fronteiras das interfaces do provete, base, topos de (e das) câmaras de ensaio, ou da membrana que o envolve e separa do fluido de confinamento (tantas vezes de grande amplitude e tempos de chegada bem distintos das correspondentes aos modos de vibração próprio do material em estudo onde as ondas fundamentais os atravessam diretamente. Também os trabalhos de colaboração da FEUP com outras instituições, deu frutos a este nível:

(i) para as V_S , com a UoW (referida) e a Universidade Militar Nueva Granada, Bogotá, nas publicações de Camacho-Tauta et al. (2015 e 2017), tendo o Prof. Jaime Santos do Técnico-ULisboa participado na primeira, tendo-se definido critérios para evitar erros de interpretação;

(ii) para as V_p , com a Universidade de Frederico II (UNINA), com um trabalho de doutoramento conjunto, num tema que envolvia modelação de solos parcialmente saturados - conceitos fundamentais (Astuto, 2021), parte do trabalho experimental desenvolvido no LabGeo.

Nesta dissertação (Astuto, 2021) recentemente aprovada são discutidos os resultados dos ensaios com BE no LabGeo numa areia monogranular parcialmente saturada, a fim de investigar as relações entre a velocidade da onda P gerada, V_p , o parâmetro de Skempton medido, B, e ainda o grau de saturação, S_r . A interpretação dos resultados no domínio do tempo mostra como ondas geradas por fatores marginais podem afetar significativamente os resultados e mascarar a avaliação do verdadeiro grau de saturação do provete. É assim necessária uma análise prévia do sinal de recebido, cujo processamento pode ser feito no domínio da frequência. Assim feito, a correlação experimental entre V_p e S_r é consistente e tem em conta a dependência do nível de deformação imposto às partículas do solo e pode ser usada para interpretar os resultados de ondas em campo. Para melhor aquilatar a importância desta aprimorada interpretação procedeu-se no âmbito da tese referida, à análise em laboratório da sensibilidade da velocidade da onda P em relação ao valor de geração de pressão neutra B de Skempton, tendo-se provado que o caminho mais rápido (logo o meio mais rígido) ao longo do qual a onda se propaga, pode ser facilmente ser condicionado por fatores de equipamento e “layout” (paredes das câmaras, interfaces entre o provete e os extremos, a membrana e a água, etc) sendo geradas ondas superficiais que podem afetar significativamente a interpretação dos registos de ondas recebidas no BE recetor. Neste trabalho procedeu-se a uma análise criteriosa do conteúdo de frequência, que conduziu à proposta de uma correção ao primeiro tempo de chegada, com base na eliminação dos registos temporais de ondas com conteúdos de frequências espúrios (mais altas). A Figura 10 compara as relações de V_p e B antes e depois da metodologia inovadora agora proposta.

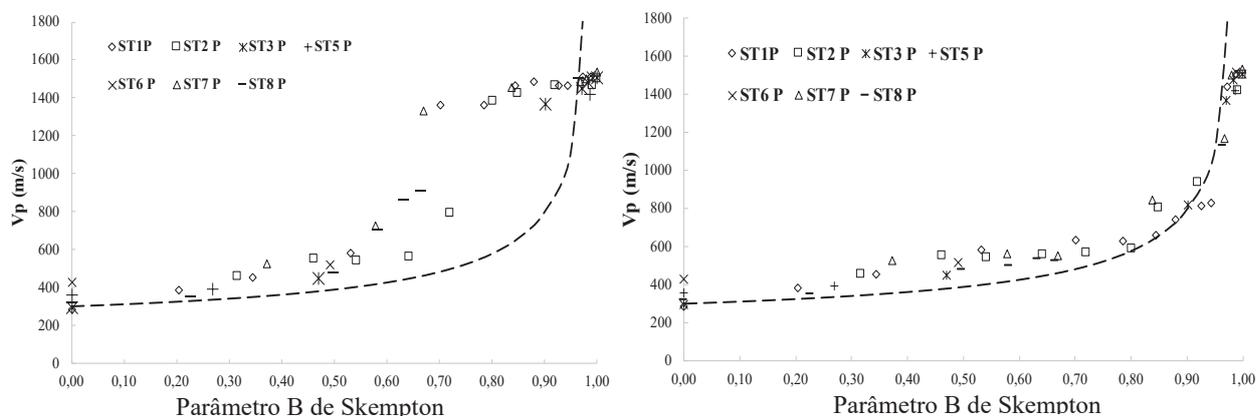


Fig. 10 – Correlação entre V_p e B (resultados obtidos na FEUP) antes e depois da aplicação da metodologia de correção no domínio das frequências proposta por Astuto (2021).

Tendo em vista uma utilização prática da V_p para verificar o grau de saturação em problemas de escala real, os resultados mostram que não é fácil verificar um grau de saturação inferior a $\approx 95\%$ (para o que se deve usar outros métodos como a resistividade), dado que o esqueleto sólido passa a prevalecer em comparação com o fluido equivalente nos poros. No entanto, a avaliação das V_p tem um grande potencial em condições quase saturadas ($95 < S_r < 100\%$), onde a presença de ar ocluso (e compressível) é dominante e pode estar associado a comportamentos muito distintos em relação a condições de saturação total, no que se refere a mecanismos instabilizadores (ex. liquefação) em solos contrácteis sujeitos a carregamentos rápidos (não drenados).

2.4 – Carregamentos estáticos ou monotônicos

2.4.1 – Linhas de Estados Críticos de Alguns Solos investigados na FEUP

Segundo Viana da Fonseca (2013), a abordagem aos problemas geotécnicos com base no parâmetro de estado (ψ) tem vindo sustentadamente a ser aplicada com sucesso no estudo da resposta dos solos na generalidade das estruturas geotécnicas em que as características hidro-geomecânicas dos maciços terroso são prevaletentes quando sujeitos a carregamentos monotônicos e cíclicos. A relação precisa entre as características de compressibilidade (contração/expansão) e resistência (friccional e/ou de pico), bem como da instabilidade precoce que pode conduzir à perda substancial de suporte, é já razoavelmente (embora não totalmente) compreendida, mas reconhece-se que a condição de estado é a chave que permitirá a caracterização e a definição de parâmetros para os modelos constitutivos baseados na TEC para análises numéricas avançadas.

Exemplo disso têm sido os muitos trabalhos de laboratório conducentes à definição das propriedades estado que podem conduzir à definição de parâmetros para modelação do comportamento de estruturas geotécnicas (disso sendo exemplo as teses de doutoramento identificadas em 2.2.1) e em análise de problemas de estabilidade de instalações de armazenamento de rejeitos (TSF), barragens ou pilhas. Em jeito de ilustração, apresenta-se só os resultados de um trabalho realizados sobre um silte inerte, da moagem de areia quartzosa de Osório (Cruz, 2008) e com granulometria semelhante resíduos siltosos de ouro estudados na tese de doutoramento de Bedin (2010), sem qualquer aditivo químico. As partículas apresentam um padrão microestrutural com arestas vivas e superfícies irregulares.

Através da realização de ensaios triaxiais em condições drenadas e não drenadas, definiu-se a sua linha de estado crítico. A Figura 11 sintetiza de trajetórias de tensão e Linhas de Estados Críticos de silte de resíduo de ouro e do silte inerte.

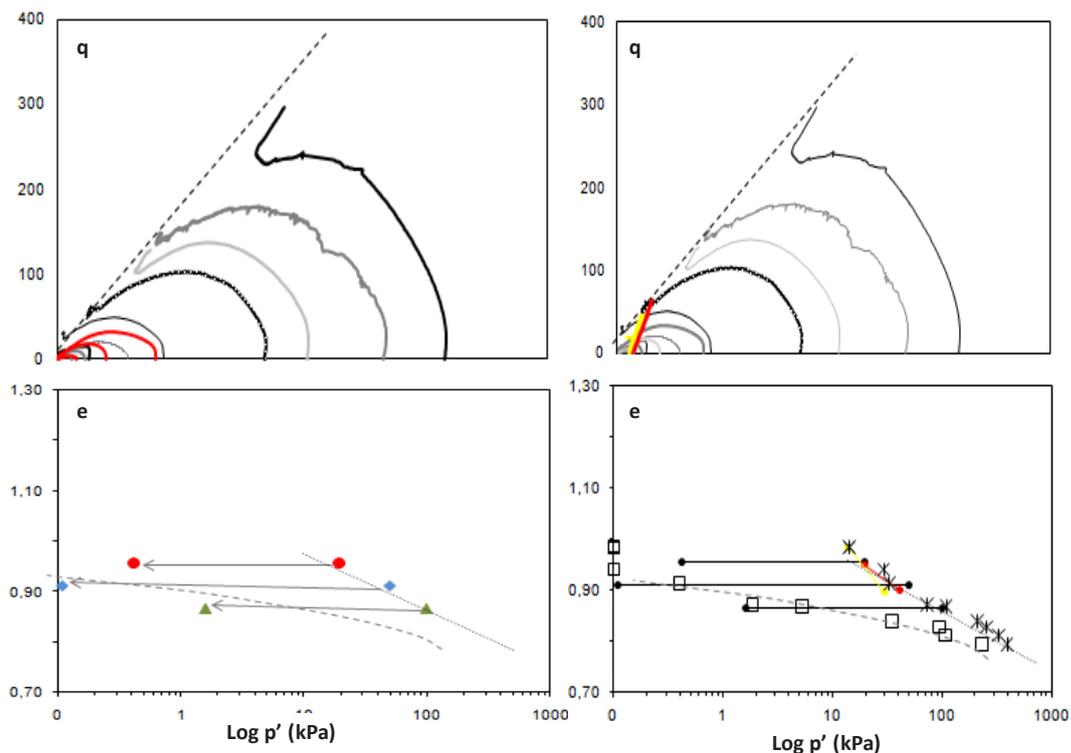


Fig. 11 – Trajetórias de tensão e Linhas de Estado Crítico de Silte de Resíduo de Ouro e de silte “inerte” gerado da areia quartzosa de Osório.

Todas as amostras apresentaram decréscimo das tensões de corte, resultando em tensões efetivas iguais ou próximas de zero para grandes deformações. Para tensões de confinamento superiores a 100 kPa, observa-se que a tensão de confinamento atinge um pico de resistência e segue com leve acréscimo para grandes deformações. Nos resultados obtidos nos ensaios drenados, observou-se deformação volumétrica e deformação axial da amostra durante todo o ensaio. A tensão de corte da amostra atingiu um valor máximo de resistência e permaneceu constante para grandes deformações. Esta condição tem direta relação com a posição do índice de vazios do estado inicial (repouso) e o correspondente na *LEC*, para o mesmo estado de tensão média efetiva, pelo que o comportamento associado com a suscetibilidade à liquefação pode ser analisado com referência ao parâmetro de estado, se complementado com a relação entre a rigidez a muito pequenas deformações (elástica) e a resistência de não drenada. Esta razão é expressa pelo designado Índice de Rigidez (I_R) cuja expressão é dada pelo quociente entre o módulo de distorção máximo ou elástico ($G_{m\acute{a}x}=G_0$) e a resistência não drenada máxima [$s_u = q_{m\acute{a}x}/2 = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$] obtida em laboratório em amostras e condições de carregamento representativos - determinável, como acima referido, pela velocidade das ondas de compressão (V_s), como detalhado em Soares (2014).

Note-se que o I_R reflete um princípio de sensibilidade (“sensitivity”, na literatura anglo-saxónica) semelhante ao índice de fragilidade que relaciona a resistência não drenada máxima pela diferença desta com a residual [$I_B = s_{u_pico}/(s_{u_pico} - s_{u_res})$], o que é o mesmo que $I_B = q_{pico}/(q_{pico} - q_{res})$, que, associando o efeito da rigidez estrutural interparticular - às vezes, mas não só, devida à cimentação entre as partículas -, traduz de forma semelhante e é mais útil, pois pode ser mais facilmente determinada, particularmente em solos com elevados volumes de vazios, ou seja, parâmetros de estado), tanto em laboratório que acima se descreveram, como in situ, particularmente os piezocones sísmicos (SCPTU) que hoje são considerados preferenciais dada a profícua fundamentação na sua interpretação analítica por via de métodos inversos e bem sustentadas correlações semi-empíricas (Robertson, 2016). Para maior generalização pode avaliar-se esta sensibilidade pela resistência de pico normalizada (q_1), definida por:

$$q_1 = \left(\frac{q_{pico}}{p_a} \right) \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5} = \left(\frac{q_{pico}}{p_a} \right) \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \right)^{0.5} \left(\frac{p_a}{\sigma'_m} \right)^{0.5} \quad (1)$$

em que q_{pico} , é a resistência de pico, p_a é a pressão atmosférica (aproximadamente 100 kPa) e σ'_{v0} é a tensão efetiva média inicial, ou pela velocidade das ondas distorcionais normalizadas (V_{s1}):

$$V_{s1} = V_{s0} \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25} = V_{s0} \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \right)^{0.25} \left(\frac{p_a}{\sigma'_m} \right)^{0.25} \quad (2)$$

sendo (V_{s0}) a velocidade das ondas para tensão efetiva média inicial.

2.4.2 – Linhas de Instabilidade de Alguns Solos investigados na FEUP

Nos trabalhos desenvolvidos deduziram-se já linhas de avaliação dessa fragilidade, aplicados em trabalhos de teses e descrito em Soares e Viana da Fonseca (2016). Com o objetivo de prever a liquefação do solo, os trabalhos acumulados na última década no LabGeo, comprovaram que a correlação entre a relação V_{s0}/q_{pico} e a tensão de desvio de pico normalizada q_1 permite definir os limites entre a liquefação verdadeira e o amolecimento por tensão para materiais mais finos, bem como entre a liquefação verdadeira e o endurecimento em deformação.

A Figura 12-a mostra que a estabilidade aumenta tanto com o aumento da velocidade da onda de corte, V_{s0} , ou rigidez inicial (G_0), quanto com o aumento da tensão de desvio não drenada de pico, q_{pico} , para todos os solos. Nesta representação os símbolos adotados visam distinguir a verdadeira liquefação (símbolos abertos), de um comportamento de amolecimento (símbolos a cinza) e de um comportamento estável, caracterizado pelo endurecimento em deformação (símbolos pretos). Esta estrutura é particularmente adequada para prever o potencial de liquefação, superando as limitações

de outras abordagens. Sendo o potencial de liquefação do solo função principalmente da contratilidade do solo, que é afetada, em primeiro lugar, pela densidade relativa (ou parâmetro de estado), sendo esta afetada pela distribuição do tamanho do grão e forma dos grãos e densidade específica, trabalhos na FEUP concluíram que o coeficiente de uniformidade (CU) é uma medida confiável do potencial de liquefação (Fig. 12-b) embora se esteja a explorar em trabalhos mais recentes o fator morfologia.

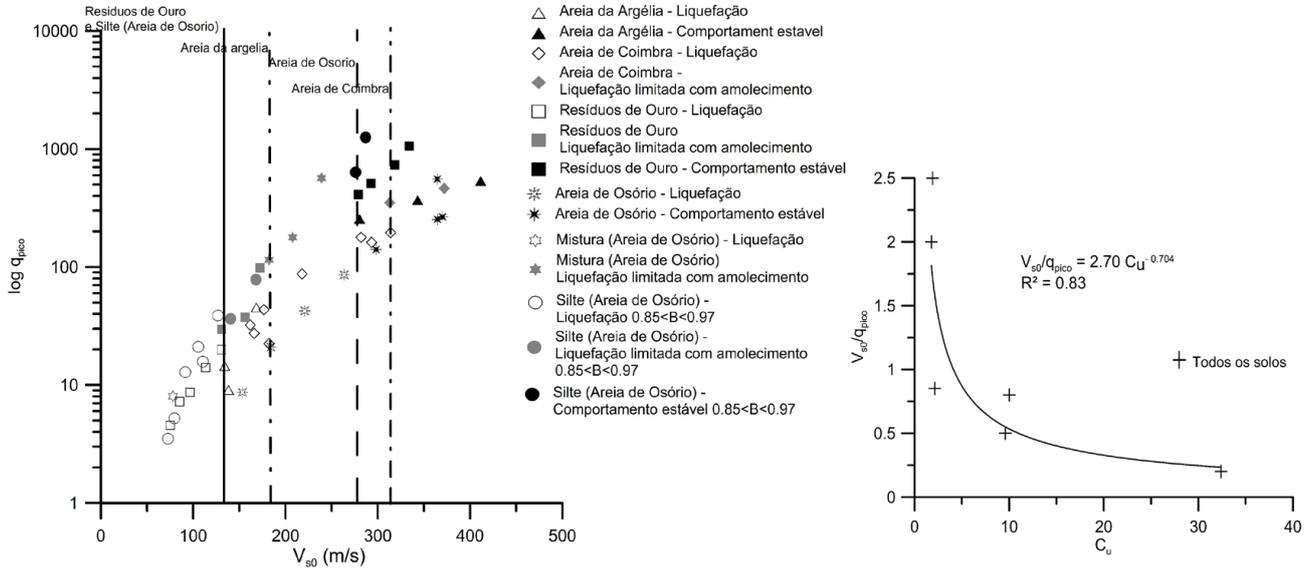


Fig. 12 – a) Resistência ao Corte de pico em função da rigidez máxima; b) Fronteira de solos com e sem amolecimento em função do coeficiente de uniformidade em solos granulares (Soares, 2014)

2.5 – Corte simples e corte direto simples, monotónico (SS, DSS) e cíclico (CSS, CDSS)

Desde 1990 que o LabGeo dispõe de um equipamento de ensaios de Corte Direto Simples (DSS), do tipo NGI, em que a amostra é confinada lateralmente com uma fronteira rígida da direção horizontal, mas flexível em relação a deslocamentos distorcionais, viabilizando pela justaposição de anéis de cobre polidos ensaios monotónico ou cíclicos de corte puro em carregamento transversal.

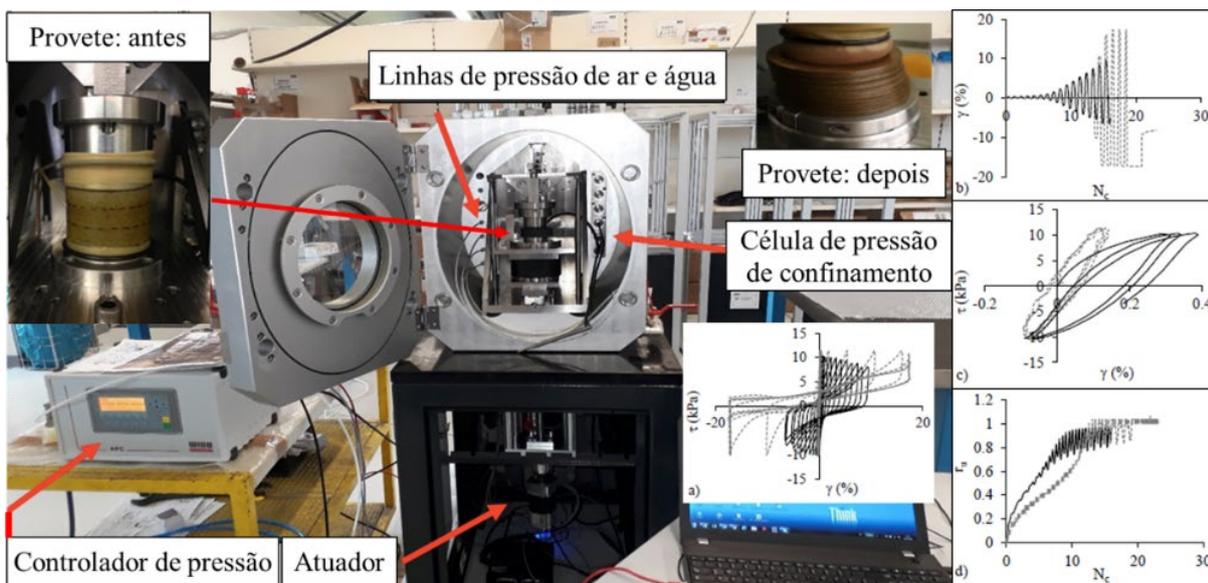


Fig. 13 – DSS/CDSS (FEUP/Wille®): caixa de ensaios na câmara, controlador de pressão, sistemas de contrapressão, medidor de volume, controlo em PC on line (resultados de ensaio).

Recentemente, pelos projetos de investigação Liquefact (H2020) e Liq2proEarth (FCT), equipou-se com um novo sistema cíclico que permite ensaios de Corte Simples, estáticos (SST) e cíclicos (CSST), do tipo UC Berkeley, ou em Corte Direto Simples, estáticos (DSST) e cíclicos (CDSST), que se ilustra na Figura 13.

No primeiro, a tensão vertical pode ser controlada – mantida constante ou seguindo um qualquer protocolo de carregamento vertical - no decurso da ação transversal, o que permite a realização de ensaios não drenados, com registos de incrementos de poropressões (Δu) associados a carregamentos monotónicos ou cíclicos, o que é particularmente útil para estudo de liquefação associados à acumulação de razões até ao limite da tensão interparticular ($r_u = \Delta u / \sigma_v' = 1$).

A segunda modalidade de corte direto simples distingue-se da primeira pela fixação das posições relativas da base e do topo do provete ao longo do ensaio de corte, ou seja, a tensão total vertical varia, decrescendo quando há tendência para diminuição de volume (solos contrácteis e eventualmente liquidificáveis) ou crescendo em solos dilatantes (densos ou cimentados). Note-se que, em estudos de liquefação de origem sísmica, a definição de condição última ou seja, a plena instabilidade, faz-se por dois critérios: $r_u = 1$ (eventualmente, 0,9%) ou limite da amplitude de deformação distorcional acumulada de $\gamma = 3.75\%$, em corte simples, ou 5% da dupla amplitude de deformação axial acumulada ($2 \times \varepsilon_a = 2 \times 2,5\%$, em torno do eixo de inversão de tensão de desvio).

O equipamento ilustrado na Figura 13 tem permitido nos últimos 5 anos um significativo número de trabalhos de investigação e prestação de serviços qualificados. Destes apontam-se os trabalhos por contrato para parametrização de variadíssimos materiais de rejeitos de mineração depositados em barragens e pilhas de grande dimensão, com vista a análises numéricas com modelos avançados para verificação de estabilidade. Dos trabalhos de investigação são resultado os outputs dos projetos referidos (www.fe.up.pt/labgeo/liq2proearth e www.liquefact.eu/publications/deliverables) e as recentes teses de doutoramento de Ramos (2021) e Teixeira (2021).

A primeira incidiu sobre o comportamento cíclico dos solos recolhidos no campo experimental na lezíria grande de Vila Franca de Xira e Benavente na margem esquerda do rio Tejo, com vista à avaliação da suscetibilidade à liquefação de origem sísmica (Saldanha et al, 2018, e Ferreira et al. 2019). Um grande número de ensaios triaxiais cíclicos (TxC) e CSS ou CDSS, permitiram avaliar os índices de características intrínsecas e de estado de solos granulares (em amostras indeformadas e reconstituídas) com influência na resistência à liquefação cíclica. Avaliou-se o efeito do tipo de carregamento imposto pelas duas metodologias experimentais, triaxial, induzindo um carregamento com inversão das tensões principais em torno do eixo isotrópico, e corte simples, com rotação das tensões principais. Esta última, mais ajustada à ação sísmica, foi analisada em trabalhos anteriores com um CSSD, tipo NGI, em colaboração com a UWA (Viana da Fonseca e Soares, 2012 e Viana da Fonseca et al. 2015b). Estes foram feitos no âmbito de um doutoramento (Soares, 2015), envolveram 86 ensaios de corte direto simples cíclico em duas areias de granulometria e morfologia distintas (Alger, Argélia, e Coimbra, Portugal). Os ensaios em densidades relativas e tensões de confinamento distintas, com tensão distorcional estática inicial nula ($K_\alpha = 1$), conduziram a conclusões importantes sobre fator correção do nível de tensão de confinamento, K_σ . Foram ainda reatados com os TxC e o novo equipamento da FEUP, na modalidade CSST - UC Berkeley, em colaboração com o Prof. Janko Logar da Universidade de Ljubljana, onde existe um equipamento de CSST da Seiken® tendo sido objeto de uma publicação síntese (Ramos et al., 2019).

A segunda que decorreu de um trabalho de investigação por contrato no LabGeo da FEUP com o Instituto Dom Luiz da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, na pessoa da Dr^a Cristina Roque (projeto FCT: PTDC/GEO–GEO/4430 /2012), para caracterização geotécnica de sedimentos da deriva oceânica no contorno de Sines, realizados em amostras recolhidas em tubos de cravação gravimétrica com 346 cm de comprimento, recolhidos a 1425 metros de profundidade da coluna de água, por ensaios de identificação física, compressibilidade e consolidação edométrica, compressão triaxial com leitura de ondas de corte (V_s) e de compressão (V_p) com Bender Elements e ensaios de corte simples monotónicos (SS) e muito lentos. Os resultados foram muito interessantes, por terem

demonstrado a importância da opção por ensaios de corte simples (pura distorção) na avaliação da resistência crítica (“residual”) em condições de carregamento estático progressivo, para avaliação do potencial de deslizamento dos sedimentos depositados na plataforma onde foram recolhidos (Teixeira, 2021). Espera-se em breve complementar com ensaios cíclicos não drenados.

3 – CONTRIBUIÇÃO DO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DO IST

O Laboratório de Geotecnia do Instituto Superior Técnico tem desenvolvido, desde a década de 90, investigação na área da dinâmica dos solos e da engenharia sísmica geotécnica. No que respeita à caracterização dinâmica e cíclica de solos, os estudos laboratoriais incidiram sobretudo em torno de duas grandes linhas:

i) avaliação do módulo de distorção e do coeficiente de amortecimento histerético dos solos, recorrendo ao ensaio de coluna ressonante e ao ensaio de torção cíclica;

ii) avaliação da resistência cíclica à liquefação através do ensaio de torção cíclica em estado de deformação distorcional simples.

3.1 – Caracterização dos solos no domínio das muito pequenas a pequenas deformações

O ensaio de coluna ressonante é o ensaio de laboratório mais amplamente utilizado para determinar as propriedades dinâmicas dos solos (módulo de distorção e coeficiente de amortecimento) no domínio das muito pequenas a pequenas deformações. Este ensaio baseia-se na teoria da propagação unidimensional das ondas num meio elástico, isotrópico e homogéneo e poderá ser do tipo axial ou de torção. Neste ensaio, um provete de solo maciço ou oco, previamente consolidado para um determinado estado de tensão fica sujeito a uma excitação sinusoidal através de um oscilador eletromagnético. O ensaio convencional consiste em, para uma determinada amplitude da excitação aplicada, fazer variar a sua frequência, por forma a atingir o ponto de ressonância do sistema. É um ensaio extremamente fiável no que respeita à determinação do módulo de distorção no domínio das muito pequenas a pequenas distorções, sendo de facto esta a sua principal particularidade. Outra particularidade deste ensaio, diz respeito ao seu carácter não destrutivo. De facto, uma vez que as extensões ou as distorções máximas atingidas são inferiores a 10^{-3} não ultrapassando, em geral 10^{-4} , considera-se que o ensaio não provoca perturbações no provete, e por conseguinte, poder-se-á ensaiar o mesmo provete para várias tensões de confinamento (Santos, 1999). O equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia do IST é do tipo torção, fabricado pela Seiken® e está representado na Figura 14.

A aplicação do ensaio de coluna ressonante tem permitido estudar a influência de diversos fatores que afetam as propriedades dinâmicas dos solos (módulo de distorção e coeficiente de amortecimento), nomeadamente o índice de vazios, a tensão efetiva, o nível de distorção, a frequência de excitação, entre outros (Santos et al., 1999; Santos e Gomes Correia, 2002a; Camacho-Tauta et al., 2010a e 2012). Foram desenvolvidas relações que definem os limites inferior e superior do módulo de distorção elástico em função do índice de vazios e da tensão efetiva normal média para solos sedimentares e solos reconstituídos em laboratório. Foi proposto um parâmetro que se denominou de distorção normalizada $\gamma^* = \gamma / \gamma_{0.7}$, como controlador da região onde se iniciam a acentuada degradação da rigidez e o aumento significativo do amortecimento histerético dos solos ($\gamma_{0.7}$ é a distorção correspondente a uma razão de $G/G_0 = 0.7$). A partir desta distorção normalizada, ficou provado que é possível estabelecer relações unificadas para estimar a degradação do módulo de distorção do solo, conforme definidas na Figura 15 (Santos e Gomes Correia, 2000; Gomes Correia et al., 2001; Santos e Gomes Correia, 2002b).

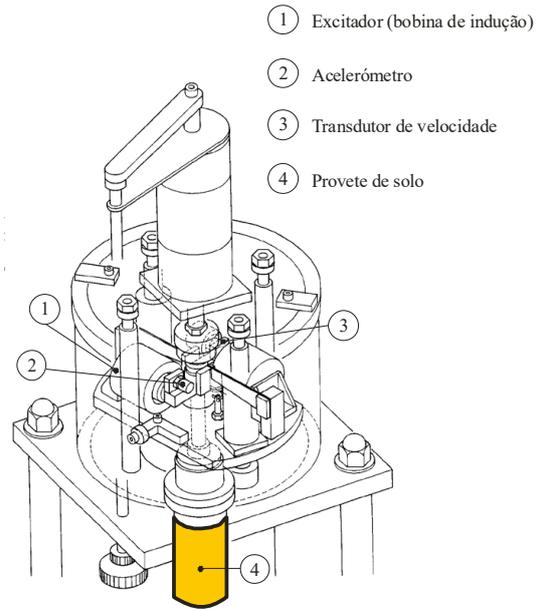
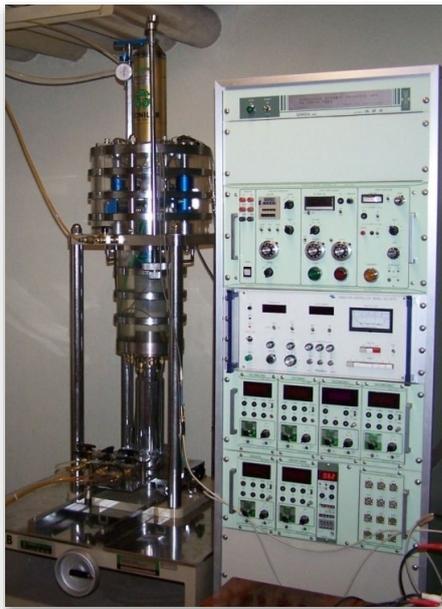
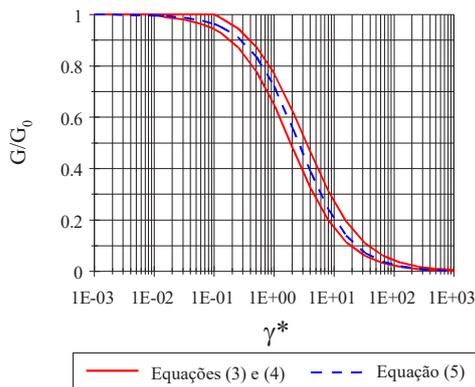


Fig. 14 – Equipamento de coluna ressonante no Laboratório de Geotecnia do IST.



$$\text{limite inferior} \begin{cases} 1 & \text{para } \gamma^* \leq 10^{-2} \\ \frac{1 - \operatorname{tgh} \left[0,48 \ln \left(\frac{\gamma^*}{1,9} \right) \right]}{2} & \text{para } \gamma^* > 10^{-2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{limite superior} \begin{cases} 1 & \text{para } \gamma^* \leq 10^{-1} \\ \frac{1 - \operatorname{tgh} \left[0,46 \ln \left(\frac{\gamma^* - 0,1}{3,4} \right) \right]}{2} & \text{para } \gamma^* > 10^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

$$G/G_0 = \frac{1}{1 + a \times \gamma^*} \quad a=0,385 \quad (5)$$

Fig. 15 – Relações unificadas G/G_0 - γ^* (Santos e Gomes Correia, 2001).

O Instituto Superior Técnico e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto têm desenvolvido investigação conjunta nesta área e foram parceiros no projeto de investigação financiado pela FCT, POCTI/ECM/55589/2004 – Propriedades Dinâmicas de Solos Residuais de Granito: Efeitos da Velocidade de Carregamento, Frequência e Tempo.

Foram desenvolvidos diversos trabalhos em termos de *hardware* (Figura 16), consequência da implementação dos sensores piezoelétricos (bender elements - BE) no equipamento do ensaio de coluna ressonante (RC) do Instituto Superior Técnico (Camacho-Tauta, 2011), que incluíram a construção de um novo acessório que permitiu a sua calibração sem danificar os BE e melhorias no sistema dos BE com a incorporação do gerador de sinais, amplificador/filtro, amplificador diferencial e osciloscópio digital.

Estas alterações no equipamento da RC permitiram a implementação de diversos tipos de ensaios, tentando cobrir todas as possibilidades do sistema, conforme mostra o Quadro 1 e a Figura 17 (Santos et al., 2007; Camacho-Tauta et al., 2008b, 2010b, 2011a, 2011b, 2014).

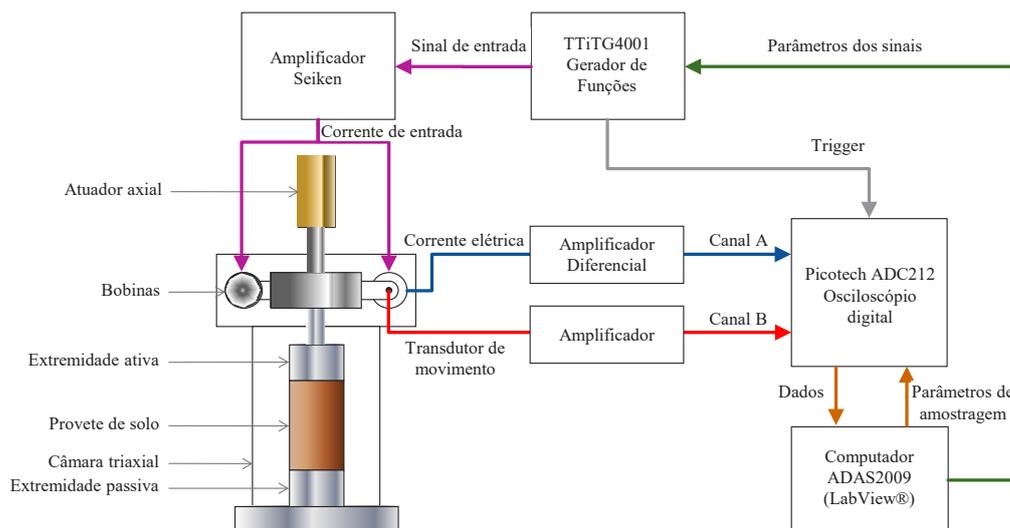


Fig. 16 – Esquema do sistema combinado RC-BE no Laboratório de Geotecnia do IST.

Quadro 1 – Configurações do sistema combinado RC-BE

Fonte sísmica \ Tipo de sinal	Impulso sinusoidal	Sinusoidal em regime de vibração permanente	Varrimento com frequência variável (<i>Sine Sweep</i>)	Ruído aleatório
oscilador da coluna ressonante		RC-CT BE-2RS	RC-SS BE-2RSS	RC-RN BE-2RSS
bender elements	BE-TD		BE-FDSS	BE-FDRN
RC-CT	:	Ensaio de coluna ressonante convencional		
RC-SS	:	Ensaio de coluna ressonante Fonte: sinal sinusoidal com frequência variável no oscilador da CR Resposta: velocímetro da CR		
RC-RN	:	Ensaio de coluna ressonante Fonte: ruído aleatório no oscilador da CR Resposta: velocímetro da CR		
BE-2RS	:	Ensaio com bender elements Fonte: sinal sinusoidal em regime permanente no oscilador da CR Resposta: bender recetor na base e bender recetor no topo		
BE-2RSS	:	Ensaio com bender elements Fonte: sinal sinusoidal com frequência variável no oscilador da CR Resposta: bender recetor na base e bender recetor no topo		
BE-TD	:	Ensaio com bender elements Fonte: impulso sinusoidal único no bender transmissor da base Resposta: bender recetor no topo		
BE-FDSS	:	Ensaio com bender elements Fonte: sinal sinusoidal com frequência variável no bender transmissor da base Resposta: bender recetor no topo		
BE-FDRN	:	Ensaio com bender elements Fonte: ruído aleatório no bender transmissor da base Resposta: bender recetor no topo		

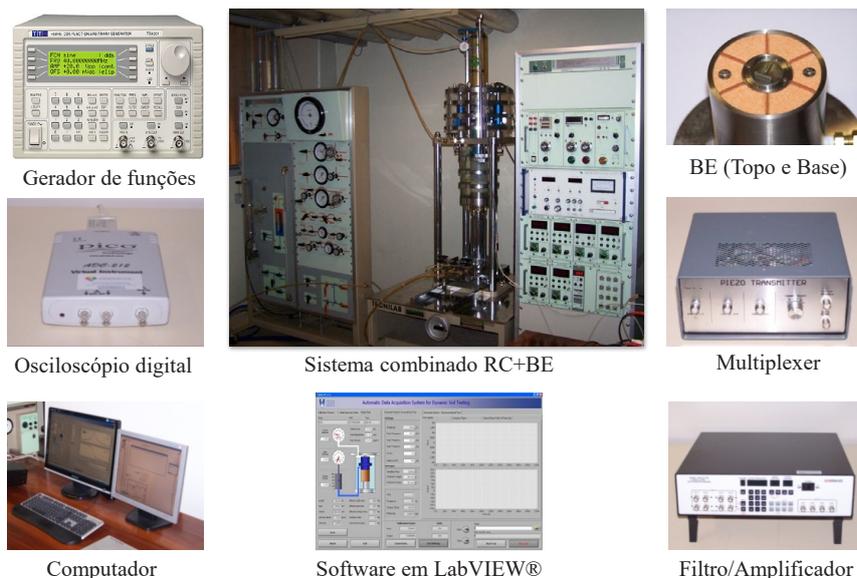


Fig. 17 – Equipamento do sistema combinado RC-BE.

O sistema combinado RC+BE exige o tratamento de grande volume de dados, pelo que foi desenvolvido um software em ambiente LabVIEW para aquisição, análise e processamento automático dos dados, contemplando todos os procedimentos convencionais ou não convencionais (Figura 18).

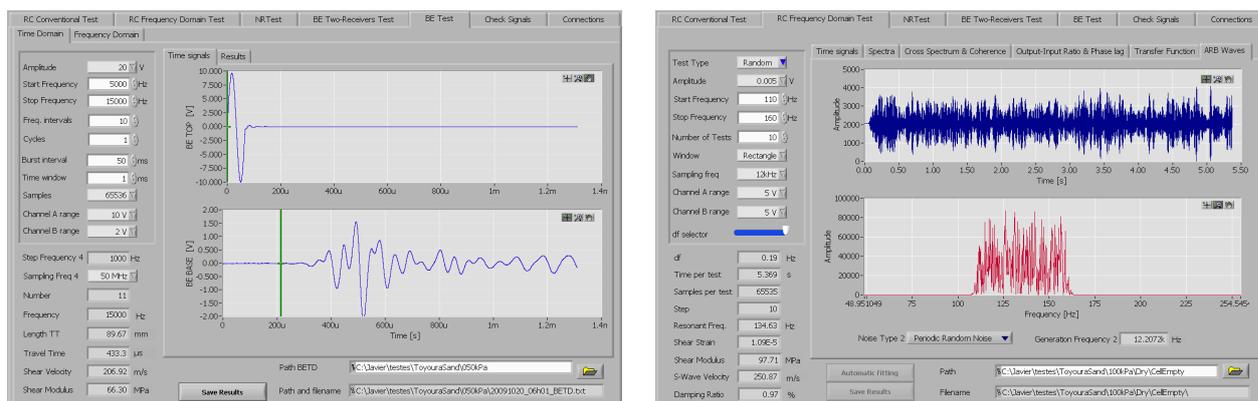


Fig. 18 – Exemplos: a) ensaio de bender elements no domínio do tempo BE-TD; b) ensaio de coluna ressonante com ruído aleatório RC-RN.

Este sistema combinado permite a realização de ensaios de coluna ressonante não convencionais com excitações de diversos tipos, podendo controlar a forma, a frequência, a amplitude e a duração ou o número de ciclos destes sinais, com toda a generalidade. Esta versatilidade de poder impor uma excitação genérica, permite realizar varrimentos no domínio da frequência e determinar a função de transferência do sistema, a partir da qual se pode analisar com maior generalidade a rigidez ao corte dos solos no domínio das muito pequenas a pequenas deformações. A Figura 19 mostra os resultados obtidos num solo siltoso para vários tipos de varrimento no domínio da frequência: 5 ensaios sem ressonância correspondentes a 5 níveis de distorção constante (NR) e 2 ensaios com varrimento *sine sweep* com distorção variável (RCSS). A gama de frequências é limitada pelas características do equipamento e o nível de distorção não deverá exceder o domínio elástico. Este tipo de análise permite uma visualização inédita da relação entre o módulo de distorção, a frequência e o nível de distorção no domínio elástico.

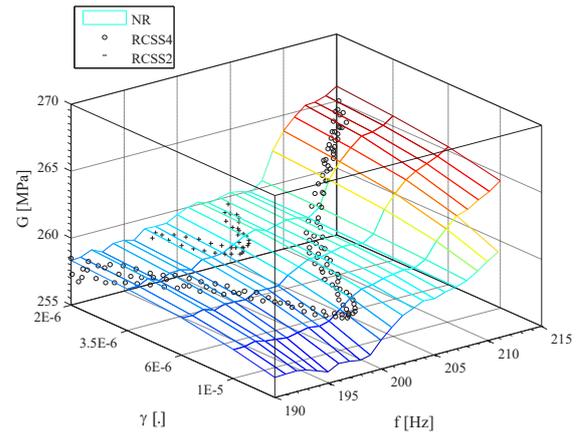
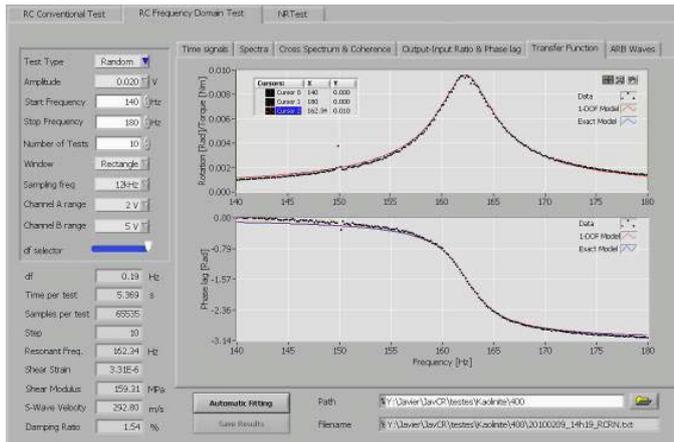


Fig. 19 – Ensaio de coluna ressonante não convencional (Camacho-Tauta et al., 2010a).

Por outro lado, a incorporação dos bender elements no mesmo equipamento permite uma comparação direta e mais fiável dos resultados. Este ponto é particularmente importante, porque permite testar diferentes técnicas de ensaio bem como uma validação consistente de diversos métodos de interpretação no domínio do tempo e no domínio da frequência sobre a mesma amostra de solo (Ferreira et al., 2007; Camacho-Tauta et al., 2008a, 2008b, 2011a, 2011b, 2015).

A investigação nesta área tem prosseguido com a colaboração da Faculdade de Engenharia da Universidade do Minho, parceiro no projeto de investigação financiado pela FCT, PTDC/ECM/122751/2010 – Innovative seismic wave-based laboratory tools for the assessment of key geotechnical parameters. Foram realizados ensaios sísmicos recorrendo a uma configuração combinada de bender elements e acelerómetros (BE+AC) sobre provetes da areia de Coimbra com uma compactidade relativa de $D_r=60\%$ (Figura 20). Também foram realizados ensaios de coluna ressonante sobre provetes da mesma areia, nas mesmas condições de compactidade relativa e tensões de confinamento.

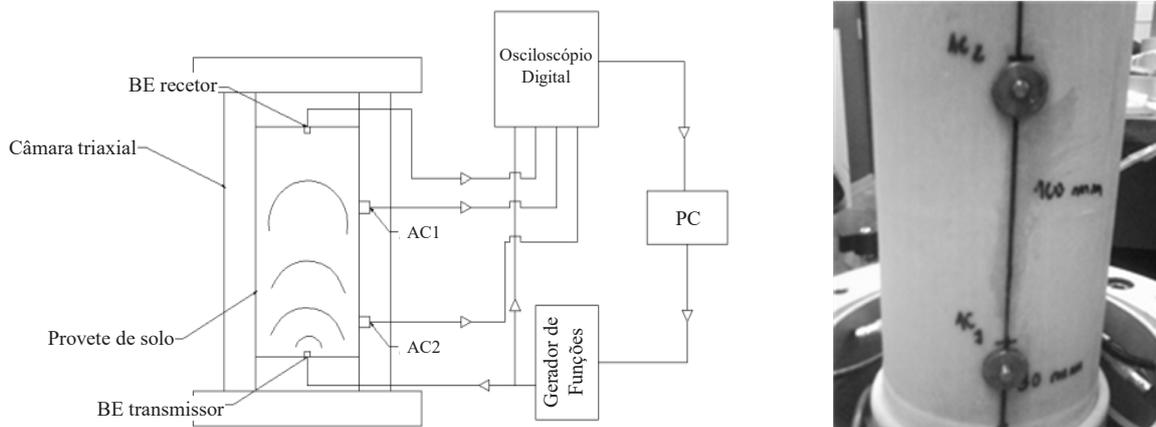


Fig. 20 – Ensaio de coluna ressonante não convencional (Camacho-Tauta et al., 2010a).

A Figura 21 mostra a comparação dos valores do módulo de distorção elástico G_0 obtidos através das diferentes técnicas de ensaio. Os dados obtidos nos ensaios de bender elements e acelerómetros foram processados no domínio do tempo (TD) e no domínio da frequência (FD), tendo-se observado desvios, em geral, inferiores a 10% em comparação com os ensaios de coluna ressonante. Este e outros estudos subsequentes mostraram que a utilização de acelerómetros como recetores em detrimento dos bender elements constitui uma via alternativa interessante a explorar, e ficou também bem demonstrado alguns problemas inerentes à utilização dos bender elements como fonte sísmica (Ferreira et al, 2007, Camacho-Tauta et al., 2015; Pereira et al., 2015; Santos et al., 2015).

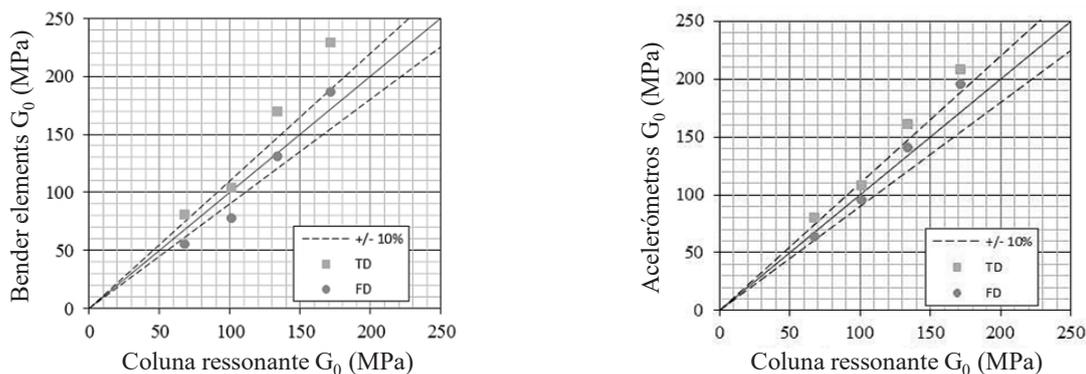


Fig. 21 – Comparação dos valores de G_0 para diferentes técnicas de ensaio (Santos et al., 2015).

3.2 – Caracterização dos solos no domínio das médias a grandes deformações

No ensaio de torção cíclica o provete de solo fica assente sobre uma base fixa e é aplicado no seu topo um momento torsor cíclico a uma frequência relativamente baixa, em geral, na gama entre 0,5 e 2Hz. O provete fica embebido numa câmara preenchida com água até ao nível do topo do provete e seguem-se os mesmos procedimentos do ensaio triaxial clássico, no que respeita à saturação e à consolidação do provete.

Como a frequência de excitação do ensaio é baixa, as forças de inércia envolvidas podem ser desprezadas simplificando-se desta forma a interpretação dos resultados. A avaliação das grandezas é feita considerando o provete como um elemento único e formulando o problema, em termos de valores médios, quer para as tensões, quer para as deformações. O problema da não uniformidade das tensões é minimizado recorrendo a provetes com secção cilíndrica oca.

A Figura 22 representa o equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia do IST fabricado pela Seiken®, com o detalhe do transdutor angular. Por forma a minimizar o erro nas medições, este transdutor está localizado no interior da câmara e o mais próximo possível do topo do provete. Segundo as especificações do fabricante, a precisão é de 0.01° , a que corresponde para as dimensões

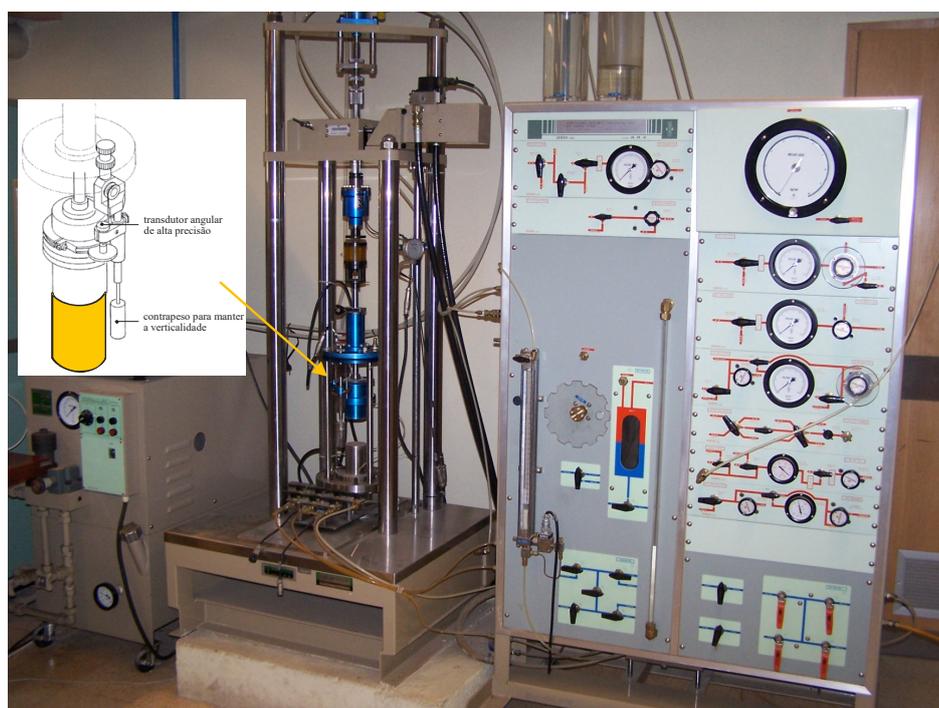


Fig. 22 – Equipamento de torção cíclica no Laboratório de Geotecnia do IST.

do provete, a uma distorção de 5×10^{-5} . Porém, na prática, verifica-se que as leituras só apresentam alguma fiabilidade para valores da distorção superiores a 10^{-4} . De salientar ainda a particularidade de o equipamento permitir impor, de uma forma expedita e sem recurso à automatização, uma trajetória em estado de deformação distorcional simples, em condições não drenadas (Santos, 1999).

Este equipamento permite realizar ensaios cíclicos para excitações harmónicas e tem sido utilizado para complementar o ensaio de coluna ressonante no domínio das médias a grandes deformações (Gomes Correia e Santos, 1997). Ou seja, a utilização conjugada do ensaio de coluna ressonante com o ensaio de torção cíclica permite caracterizar os solos numa faixa ampla de distorções entre 5×10^{-6} e 5×10^{-2} .

Os ensaios laboratoriais têm sido úteis para o desenvolvimento e a calibração de modelos viscoelásticos não lineares (Chitas et al., 2012; Lourenço et al., 2017) e de modelos elastoplásticos com particular enfoque sobre o endurecimento e o comportamento volumétrico dos solos granulares (Santos et al., 2003; Gomes et al., 2016; Lourenço et al., 2017, Santos et al., 2017).

Destaca-se ainda a colaboração entre o Instituto Superior Técnico e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, parceiros no projeto de investigação financiado pela FCT, PTDC/ECM/103220/2008 - *Tools for performance-based design in liquefiable deposits*, em que se analisou a influência dos finos não plásticos na resistência à liquefação da Areia de Coimbra (Marques, 2011; Marques et al., 2012a, 2012b, 2012c). Alguns dos resultados deste projeto de investigação serão apresentados no capítulo final deste artigo.

4 – CONTRIBUIÇÃO DO LABORATÓRIO DE GEOTECNIA DA FCTUC

O Laboratório de Geotecnia da Universidade de Coimbra (UC), que está desde a sua origem vocacionado sobretudo para a investigação científica, tem tido um papel relevante no desenvolvimento da caracterização experimental do comportamento de areias, tanto de origem nacional como internacional, quando sujeitas a solicitações generalizadas, quer monotónicas quer cíclicas, aplicadas sob diferentes condições de drenagem. Tal resultou do trabalho desenvolvido por vários investigadores envolvidos em projetos de investigação e/ou teses de Mestrado ou Doutoramento na UC, os quais beneficiaram das condições experimentais oferecidas pelo Laboratório de Geotecnia, nomeadamente ao nível:

- dos equipamentos laboratoriais, em particular das “Stress Path Cells” (células de caminhos de tensões), do “Hollow Cylinder Apparatus” (HCA), combinados com diferentes equipamentos para instrumentação interna e para medição da velocidade de propagação de ondas;
- do sistema de controlo e aquisição automáticos de dados (TRIAX);
- do desenvolvimento de sistemas particulares de preparação de amostras, nomeadamente por pluviação seca, e validação da sua repetibilidade e reprodutibilidade.

É importante destacar que o sucesso do trabalho experimental desenvolvido sobre areias no Laboratório de Geotecnia da UC deve-se, em grande medida, à visão que o Professor Luís Joaquim Leal Lemos incutiu desde a génese da Geotecnia no Departamento de Engenharia Civil da UC, fundamentalmente baseada na importância do trabalho experimental, a qual foi reforçada por vários dos investigadores do Grupo de Geotecnia da UC, em particular daqueles que adquiriram uma visão anglo-saxónica do trabalho científico aquando da sua estadia em Universidades Inglesas e Americanas. No entanto, o contributo para o avanço do conhecimento neste domínio teria sido inalcançável sem o trabalho dos investigadores que ao longo dos últimos anos utilizaram o Laboratório de Geotecnia da UC para a realização de trabalhos de investigação focados na caracterização do comportamento de diferentes tipos de areias nas mais diversas perspetivas, os quais têm demonstrado o valor do trabalho experimental para o progresso científico, nomeadamente mas não só para uma compreensão mais detalhada do seu comportamento e para a calibração de modelos de comportamento de solos avançados. Uma pequena parte desse trabalho é utilizado nas secções seguintes para ilustrar a importância da evolução do Laboratório de Geotecnia da UC no estudo do comportamento de areias sob ações generalizadas.

4.1 – Contributo dos equipamentos laboratoriais avançados

O Laboratório de Geotecnia da UC oferece aos seus utilizadores um conjunto de equipamentos capazes de permitir uma caracterização experimental completa de diferentes tipos de geomateriais, em particular de areias, nas várias perspetivas relevantes do ponto de vista do seu comportamento. Tal inclui a avaliação das propriedades físicas e de identificação, da permeabilidade, da compressibilidade e do comportamento tensão-deformação sob diferentes tipos de solicitações. Na caracterização do comportamento mecânico de areias sob ações generalizadas através de ensaios elementares, dois equipamentos têm sido particularmente determinantes na avaliação do comportamento de areias sob solicitações monónicas e cíclicas e para níveis de tensão variáveis:

- as stress-path-cells (ou células de caminhos de tensões), adiante designadas por SPC, pela sua capacidade de induzir nas amostras diferentes trajetórias de tensões associadas a diferentes estados de tensão axissimétricos, de forma a reproduzir de forma relativamente realista o comportamento das areias quando sujeitas às solicitações mais comuns presentes no campo;

- o Hollow Cylinder Apparatus (ou aparelho do cilindro oco), adiante designadas por HCA, pela sua capacidade de induzir nas amostras quaisquer trajetórias de tensões associadas a diferentes estados de tensão, em que a variação da magnitude da tensão principal intermédia e a direção das tensões principais podem ser variadas de forma controlada e progressiva.

4.1.1 – Stress-path-cells

O Laboratório de Geotecnia da Universidade de Coimbra possui duas SPC semelhantes, fornecidas pelo Imperial College London, capazes de controlar, de forma independente, as tensões verticais e radiais aplicadas sobre uma amostra cilíndrica com aproximadamente 76 mm de altura e 38 mm de diâmetro (Figura 23). A força vertical é aplicada através do êmbolo onde a amostra se

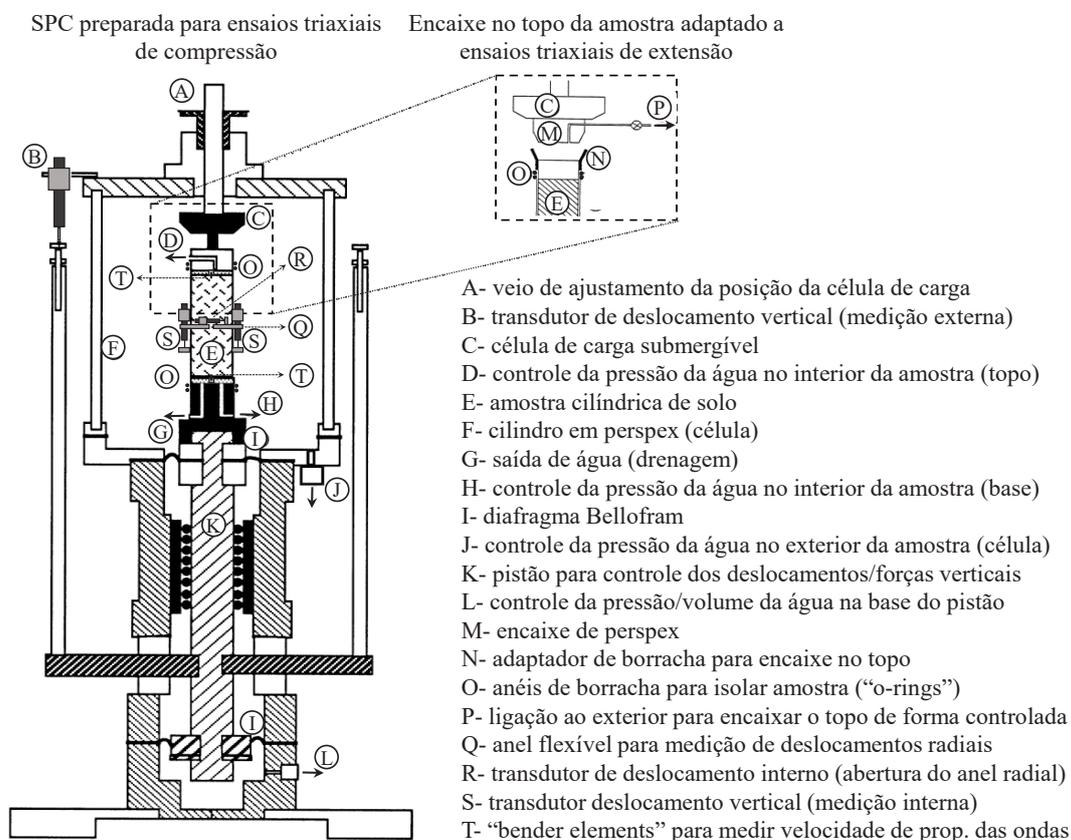


Fig. 23 – Stress-path-cell (SPC) do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Coimbra (adaptado de Coelho, 2000).

apoia e medida por uma célula de carga submersível em contacto com o topo da amostra, enquanto a tensão radial é aplicada através da pressão da água que envolve a amostra, como originalmente descrito por Bishop e Wesley (1975). No caso de ensaios de extensão, é utilizado um adaptador no contacto da célula de carga com o topo da amostra para que a tensão vertical se controle de forma independente da tensão radial e possa ser inferior a esta. Desta forma, é possível simular os 4 caminhos de tensões fundamentais utilizados para caracterizar o comportamento de solos sob formas de carregamento representativas das presentes *in situ*, os quais são obtidos fazendo variar a tensão vertical ou a tensão radial, mantendo a outra tensão constante, ou mesmo aplicar outro qualquer caminho de tensões menos convencional que procure replicar uma situação particular em obra ou esclarecer uma questão específica numa perspetiva mais científica.

As SPC disponíveis no Laboratório de Geotecnia da UC podem ainda ser adaptadas para integração de equipamentos internos para medição das deformações axiais e radiais da amostra, assim como para medição da velocidade de propagação de ondas ao longo da amostra. No primeiro caso, tal é particularmente útil para eliminar os efeitos negativos dos erros de ajustamento da amostra no início dos ensaios, para uma avaliação mais precisa das deformações axiais e radiais na zona central da amostra. No segundo caso, a utilização dos designados “bender elements” para induzir as ondas de corte no topo da amostra e registar a sua chegada à base, permite uma avaliação da rigidez ao corte do solo para muito pequenas deformações e uma estimativa incomparável de G_0 ou G_{Max} .

As capacidades das SPC do Laboratório de Geotecnia da UC na caracterização do comportamento de areias sob diferentes tipos de solicitações são bem ilustradas através da caracterização do comportamento da areia de Hostun apresentada por Azeiteiro et al (2017a), a qual foca o comportamento observado para diferentes níveis de deformação, incluindo tipos de solicitação variadas e aplicadas em condições drenadas e não drenadas.

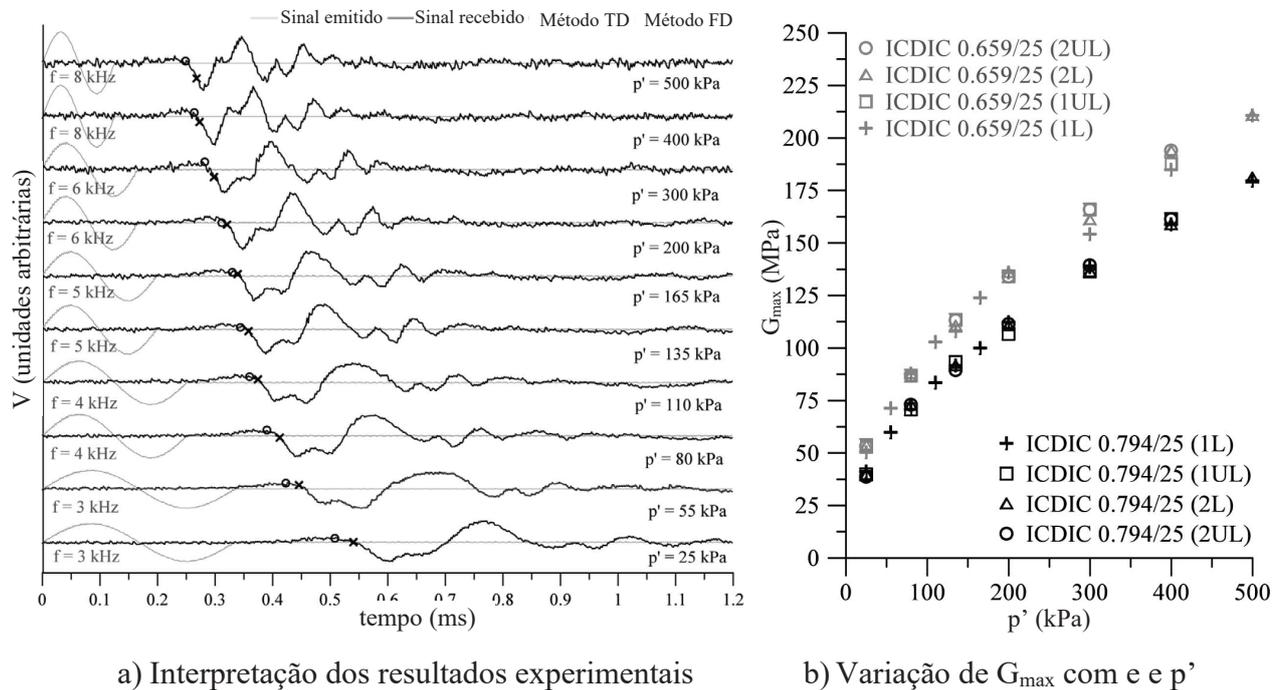


Fig. 24 – Rigidez ao corte da Areia de Hostun para pequenas deformações (Azeiteiro et al., 2017a).

Ao nível das muitas pequenas deformações, onde se pode assumir que o solo se comporta em regime elástico, a utilização dos bender elements instalados na SPC permitiu avaliar a rigidez ao corte inicial ou máxima (G_{max}) da areia de Hostun. A interpretação dos resultados, que pode ser realizada no domínio do tempo (TD) ou no domínio da frequência (FD), tem alguma incerteza na identificação do momento da chegada da onda (Figura 24-a). Ainda assim, os resultados obtidos

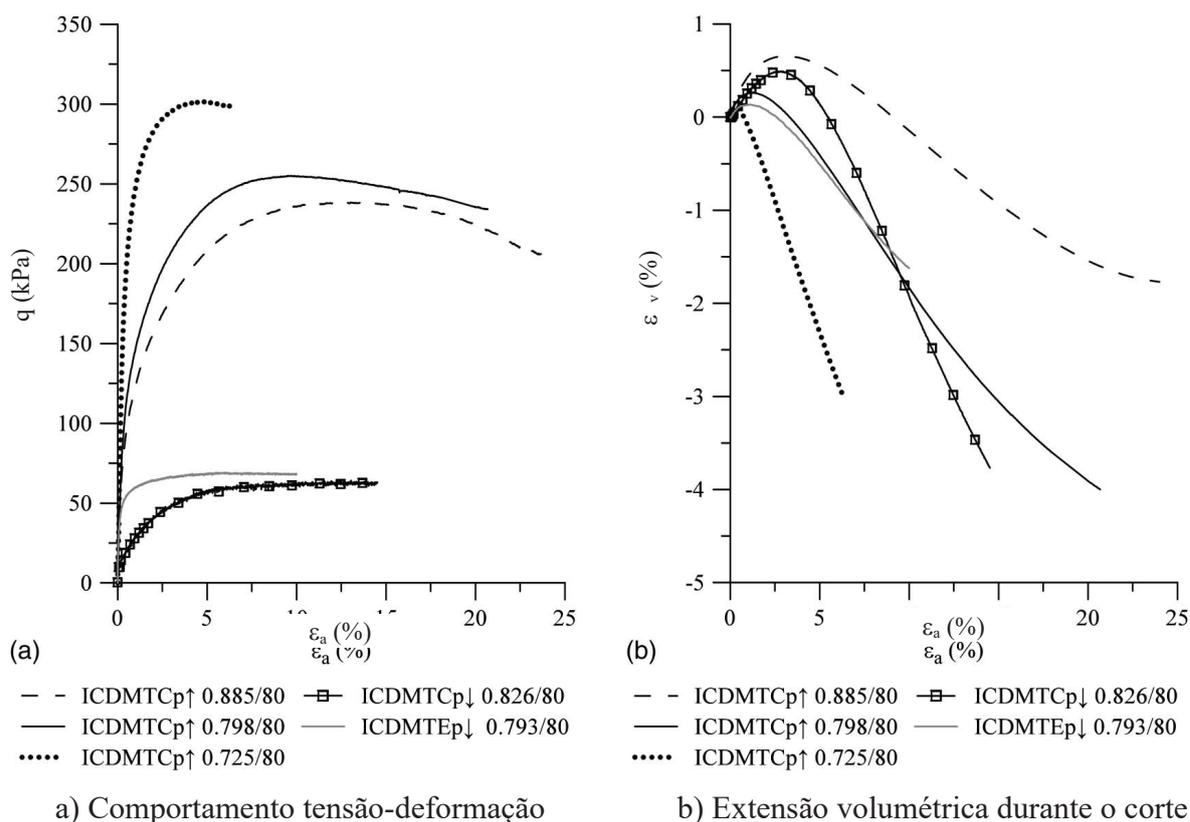


Fig. 25 – Comportamento da Areia de Hostun durante o corte drenado para diferentes caminhos de tensões e índices de vazios das amostras (Azeiteiro et al., 2017a).

mostram de forma clara o aumento de G_{max} com o aumento da tensão efetiva de consolidação (p') e com a redução do índice de vazios (e) ou com o aumento da compactação da areia (Figura 24-b).

Ao nível das deformações intermédias a grandes, os resultados obtidos mostram os efeitos do índice de vazios (e) da amostra e do caminho de tensões seguido durante o corte nos ensaios drenados (Figura 25) e nos ensaios não drenados (Figura 26), mesmo se realizados sob a mesma tensão de consolidação isotrópica (80 kPa). Nos ensaios drenados, é bem evidente o aumento da rigidez e da resistência máxima com a redução de e nos ensaios de compressão com aumento da tensão média, sendo ainda evidentes os enormes efeitos resultantes do corte em compressão com redução da tensão média ou em extensão com redução da tensão média (Figura 25-a). A deformação volumétrica exibida pelas amostras durante o corte (Figura 25-b), ainda que qualitativamente semelhante, é também bastante influenciada pelo caminho de tensões seguido durante o corte e pelo índice de vazios da amostra. Já no que se refere ao corte não drenado, as principais diferenças são observadas ao nível do caminho de tensões efetivas seguido pelas amostras no início do corte, o qual é determinado pelo excesso de pressão neutra gerado no corte (Figura 26-a), assim como pela resposta tensão-deformação, a qual exhibe muito maior rigidez nas amostras mais densas e/ou sujeitas ao corte em compressão com aumento da tensão média (Figura 26-b). Estes resultados mostram a importância do conhecimento do tipo de sollicitação presente na situação particular em estudo assim como da capacidade para simular experimentalmente essa sollicitação.

Ao nível das grandes deformações, a caracterização do comportamento das areias quando atingem o estado crítico assume grande importância, nomeadamente mas não só para permitir a utilização de modelos de comportamento do solo avançados baseados na teoria do estado crítico. A Figura 25 mostra a linha do estado crítico (CSL) da areia de Hostun estimada com base nos resultados dos ensaios realizados nas SPC da UC.

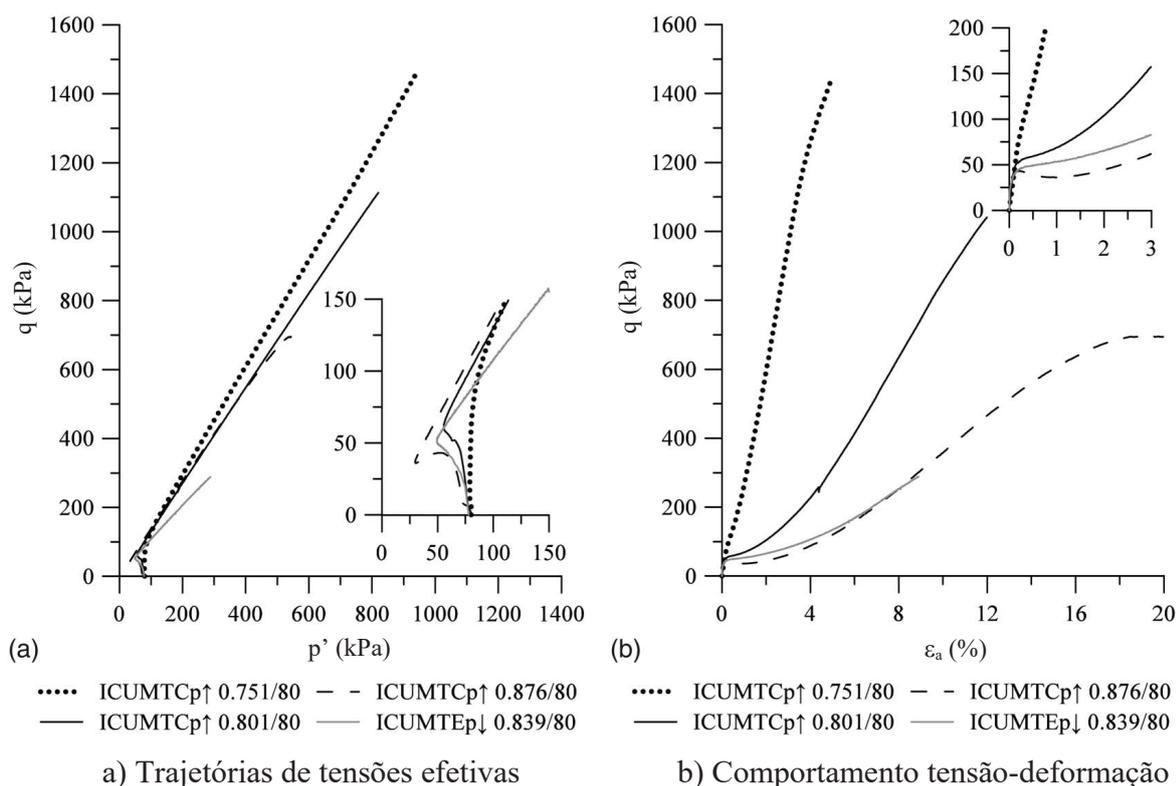


Fig. 26 – Comportamento da Areia de Hostun durante o corte não drenado para diferentes caminhos de tensões e índices de vazios das amostras (Azeiteiro et al., 2017a).

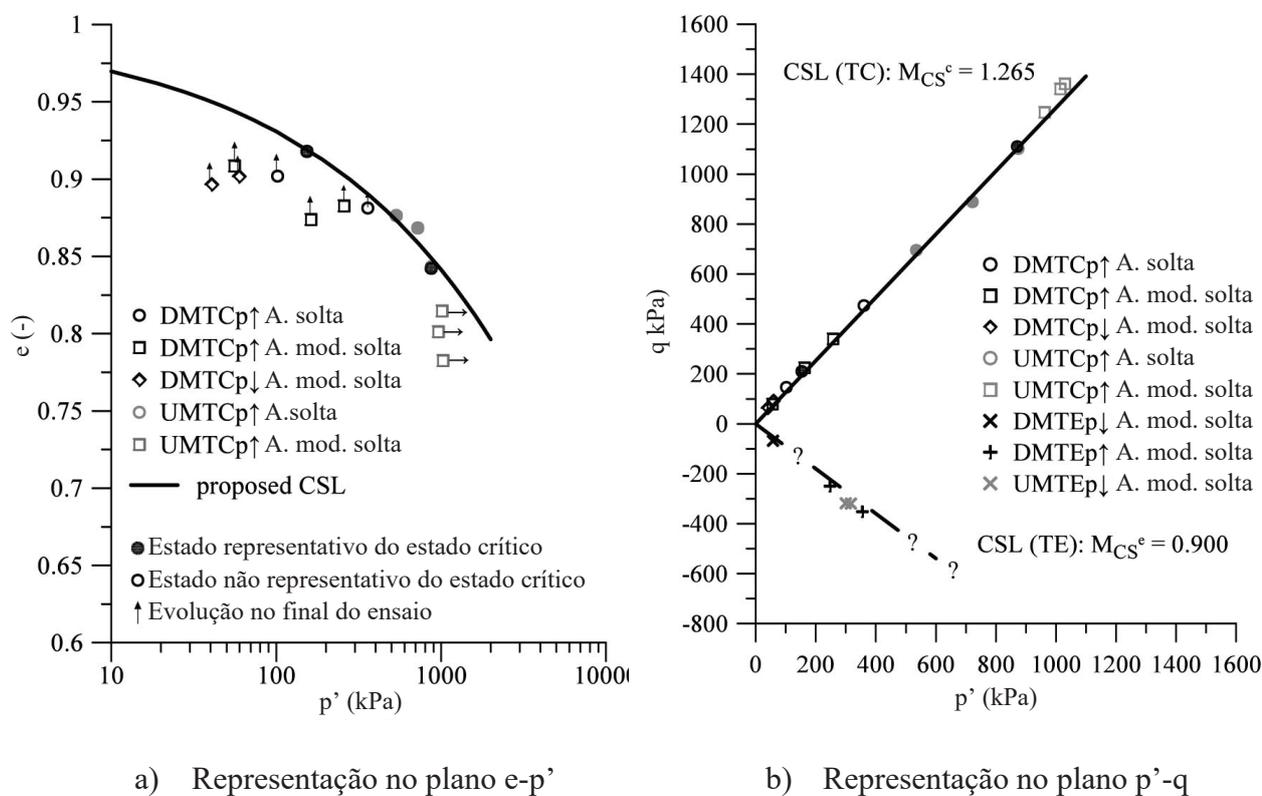


Fig. 27 – Linha do estado crítico da Areia de Hostun (Azeiteiro et al., 2017a).

É de notar que apesar da capacidade das SPC para induzirem nas amostras deformações axiais de grande magnitude, que chegam a atingir valores da ordem de 25 % (Figura 25), nem sempre é possível identificar de forma clara o estado crítico, seja porque seria necessário continuar a deformar a amostra, seja porque a concentração de deformações e/ou tensões na amostra dificultam a sua observação. Tais problemas são mais evidentes nos ensaios de extensão (TE) mas também afetam muitos dos resultados obtidos em ensaios de compressão (TC), afetando mais a avaliação da representação da linha do estado crítico no plano p' - e (Figura 27-a), onde é frequentemente prever a evolução do caminho das amostras no final do ensaio, do que no plano p' - q (Figura 27-b), onde sobretudo em compressão a definição da CSL é menos subjetiva.

4.1.2 – Hollow Cylinder Apparatus

O HCA do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Coimbra (Figura 28), fornecido pelo Imperial College London, permite o controlo, de forma independente, do momento torsor e das tensões verticais e radiais, externa e interna, aplicadas sobre uma amostra cilíndrica oca sujeita a uma contrapressão, conforme originalmente descrito por Hight et al (1983). A amostra pode ter cerca de 200 mm de altura, 100 mm de diâmetro externo e 60 mm de diâmetro interno, ainda que possam ser usadas amostras com dimensões de 300, 200 e 150 mm, respetivamente. O funcionamento do equipamento é descrito em detalhe por Santos (2015), destacando-se a sua capacidade para controlar as 3 tensões e direções principais, incluindo a tensão principal intermédia, e para aplicar solicitações cíclicas que melhor replicam a ação das ondas corte induzidas por sismos no campo.

O equipamento inclui um conjunto de equipamentos para medição de deformações internas, de forma a avaliar de forma precisa a deformação da amostra durante o ensaio. De facto, como ilustrado na Figura 28, para além da medição externa na parte inferior do equipamento das deformações axiais (5) e angulares (6), a deformação da amostra é avaliada localmente através de transdutores submersíveis que incluem um eletrónivel biaxial (1) e outro uniaxial (3) instalados na parede exterior do cilindro, um transdutor de deslocamento miniatura (2) instalado perpendicularmente às paredes internas do cilindro oco e três sensores de proximidade (4) para medir as deformações na direção perpendicular às paredes externas do cilindro em três zonas distintas.

A utilização de alguns dos instrumentos de medição no HCA exigiu o desenvolvimento de sistemas especiais de calibração (Figura 29), nomeadamente para a célula de carga combinada para medição de forças verticais e momentos torsores, para o transdutor de deslocamento miniatura para avaliação das deformações radiais na face interna do cilindro oco, para os transdutores de proximidade, com alvos semelhantes aos usados em ensaios, e ainda para os eletróníveis (transdutores de inclinação eletrólitos) uniaxial e biaxial, destinados a medir as deformações axiais e as deformações angulares diretamente no corpo da amostra. Vários dos sistemas de calibração foram projetados e construídos por Santos (2015), que descreve em detalhe as características dos sistemas e processos de calibração.

Santos (2015) compara os resultados obtidos (Figura 30) por instrumentação interna (local) e externa (global), sugerindo que, nos ensaios de compressão (a) e de extensão (b), a instrumentação global tende, como é usual, a sobreavaliar a extensão axial (ϵ_a) para pequenas deformações, enquanto se obtêm valores idênticos para extensões da ordem de 0,02% e 0,03%, respetivamente. No caso da distorção, medida em ensaios de torção (c), a instrumentação interna e externa fornecem leituras idênticas para valores significativamente pequenos, da ordem de 0,001%, sugerindo que os erros de compressibilidade e de contacto podem afetar mais as medições globais da extensão axial do que da distorção. Já no que se refere às extensões radial (d) e circunferencial (e), a instrumentação interna e a externa conduzem a resultados mais díspares, o que pode traduzir o facto de as medições globais serem afetadas por erros devidos à compressibilidade do equipamento, onde se incluem os tubos de drenagem, ou a erros na medição da extensão axial e da variação volumétrica da câmara interna, para além de assumirem um modelo de deformação da amostra em cilindro reto, que se verifica ser irrealista. As deformações internas, por seu lado, podem ser afetadas por outros problemas,

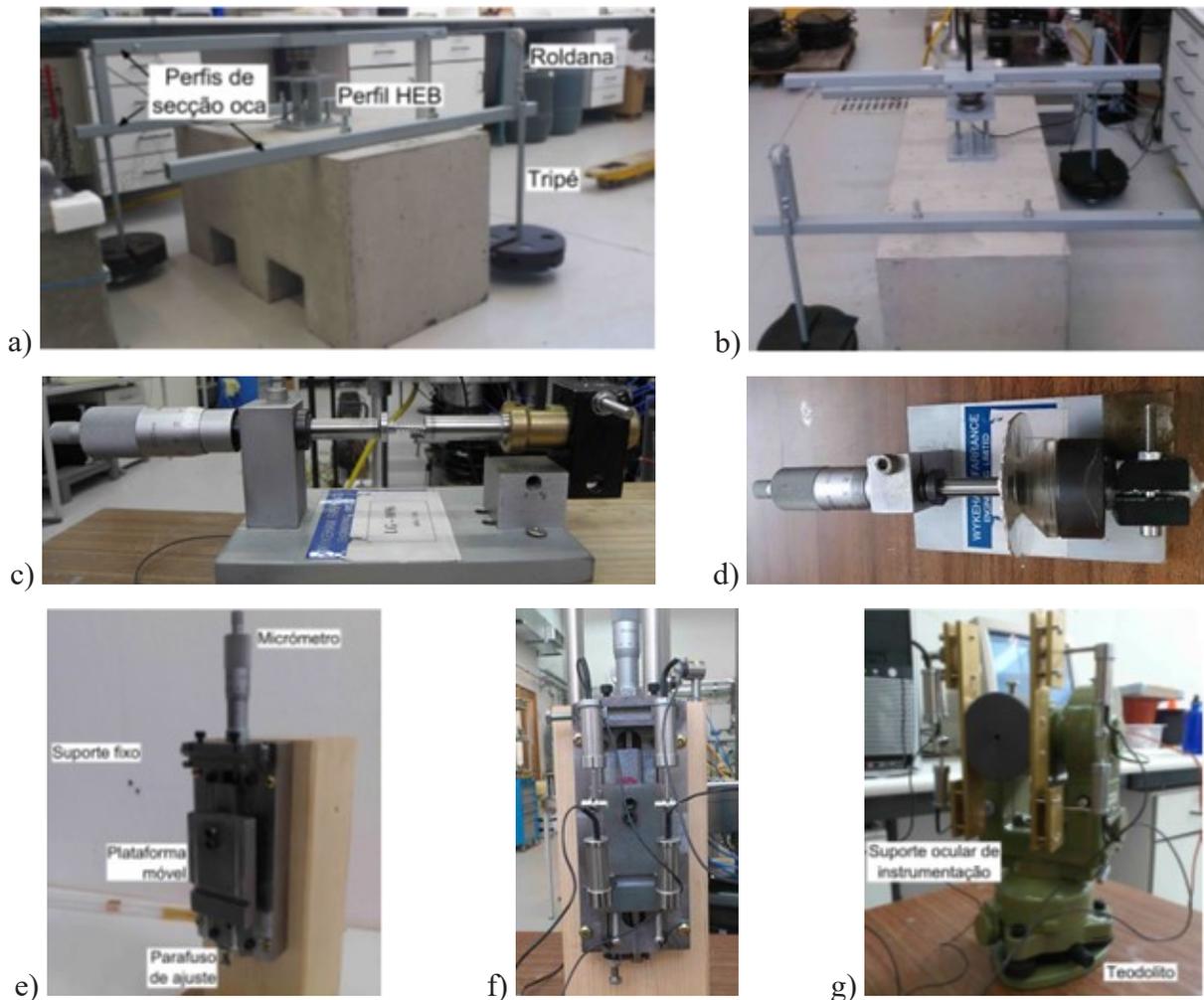


Fig. 29 – Calibração de equipamentos de medição do HCA da UC: célula de carga combinada em torção pura (a) e com interação entre momento torsor e carga axial (b); transdutor de deslocamento miniatura (c); sensor de proximidade (d); calibrador desenvolvido (e) para calibração dos eletrónicos uniaxial (f) e biaxial (g) (Santos, 2015).

nomeadamente pelo mau desempenho dos sensores de proximidade, sobretudo devido ao uso de alvos de folha de alumínio, que resultam em oscilações evidentes da extensão radial medida (d).

O HCA permite aplicar às amostras quaisquer estados de tensão na fase de consolidação e no corte, tornando-o o equipamento de eleição para a avaliação do comportamento de areias sob ações generalizadas. No campo das solicitações cíclicas, o HCA é particularmente indicado para estudos de liquefação induzida por sismos, uma vez que a solicitação induzida pelos sismos no campo é melhor representada pelo corte torsional cíclico aplicado no HCA do que pelo carregamento axial cíclico aplicado numa SPC, onde a rotação brusca de 90° da direção principal que ocorre duas vezes em cada ciclo afeta o comportamento não drenado das areias. De facto, como ilustra a Figura 31 para as Areias de Coimbra e de Hostun, o comportamento cíclico não drenado de areias no HCA tende a exibir uma evolução mais realista do caminho de tensões efetivas até à liquefação e do comportamento tensão-deformação e da geração de pressão intersticial após esse momento.

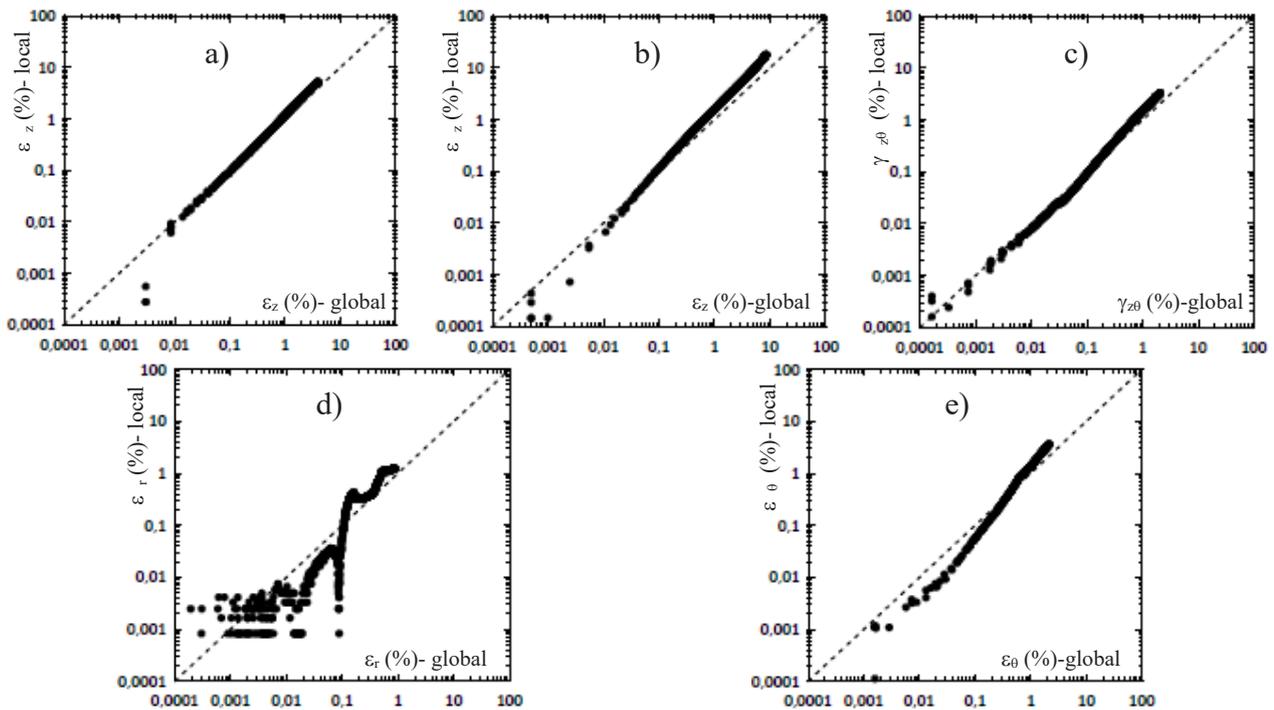


Fig. 30 – Comparação dos resultados obtidos sobre a Areia de Coimbra com instrumentação interna (local) e externa (global) no HCA da UC: extensão axial em compressão (a) e extensão (b); distorção em ensaios de torção (c); extensão radial (d) e circunferencial (e) (Santos, 2015).

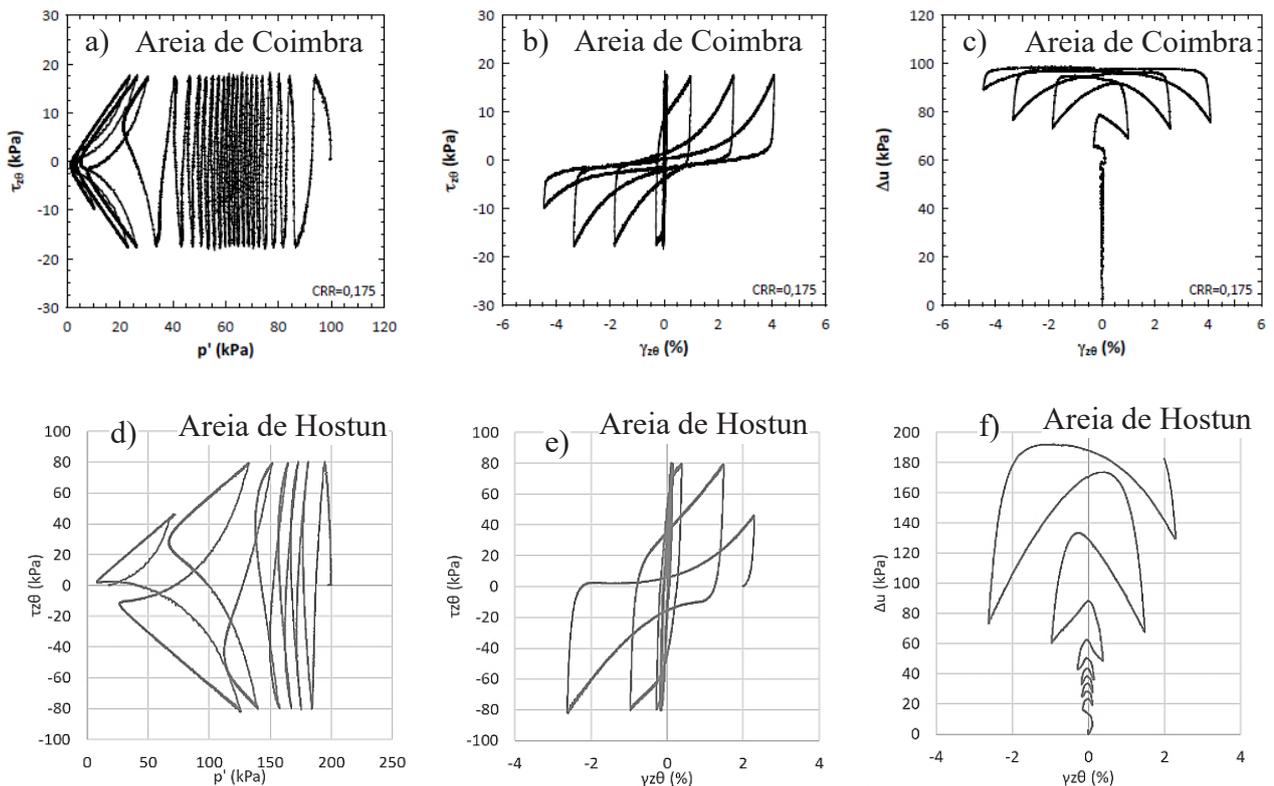


Fig. 31 – Ensaio cíclico torsional não drenado em amostras de Areias de Coimbra (Santos, 2015) e de Hostun (Ramos, 2018) no HCA da UC: caminho de tensões efetivas (a,d); comportamento tensão-deformação (b,e); variação do excesso de pressão intersticial no corte (c,f).

4.2 – Contributo do sistema de controlo e aquisição automáticos de dados

O sucesso da investigação experimental em laboratório depende bastante da capacidade para controlar os ensaios e observar o comportamento das amostras em condições que com frequência se afastam das que estão normalizadas ou são mais comuns, pelo que a utilização de sistemas comerciais de controlo e aquisição de dados pode ter alguns inconvenientes. Os equipamentos de ensaio do Laboratório de Geotecnia da UC são controlados por um sistema orientado para a investigação, designado por TRIAX, desenvolvido na Universidade de Durham nas versões para DOS (Toll, 1993) e mais tarde para Windows (Toll, 2002). A Figura 32 esquematiza o sistema que controla e adquire os dados no HCA, o qual é semelhante ao das SPC, ainda que mais complexo devido ao maior número de reguladores de pressão a controlar e ao maior número de leituras de instrumentos a adquirir e registar. O sistema possui algumas particularidades, entre as quais se destacam as seguintes:

- o controlo do ensaio é feito através da regulação de pressão num conjunto de tubos hidráulicos capazes de aplicar pressões, forças e/ou momentos sobre a amostra de forma programada;
- a regulação é feita geralmente através de reguladores de pressão de ar instalados em linhas de abastecimento de ar comprimido e posteriormente transformadas em pressões hidráulicas através de interfaces ar-água, com exceção dos designados CRSP (Constant Rate Strain Pump), que aplicam diretamente as pressões hidráulicas nas linhas de controle do ensaio;
- o controle do ensaio é feito através de programação da variação individual das pressões, forças e/ou momentos controlados por cada um dos reguladores, podendo incluir leituras dos instrumentos obtidas durante o ensaio ou ainda resultados de cálculos baseados nessas leituras;
- as leituras a registar e a sua frequência são programáveis em função do tipo de ensaio;
- o sistema inclui um módulo que facilita a calibração individual dos vários instrumentos.

A Figura 33 ilustra os resultados de um ensaio cíclico não drenado realizado na SPC da UC, com o objetivo de avaliar as implicações de aceitar que as ações sísmicas, tipicamente caracterizadas por ciclos irregulares, podem ser replicadas por ações cíclicas de amplitude uniforme como habitualmente se assume em ensaios elementares cíclicos (Azeiteiro et al, 2017b). Tendo em conta o número de ciclos aplicado e ainda que cada ciclo é aplicado de forma lenta para permitir a leitura adequada de todos os instrumentos utilizados, alguns destes ensaios demoram vários dias a ser concluídos. Além disso, a simulação de um único pico com amplitude dupla dos restantes é feita num momento particular, definido neste caso como sendo aquele em que, devido à geração de excesso de pressão neutra típica de solos granulares sujeitos a ações cíclicas em condições não drenadas, p' se reduz 20% em relação ao seu valor inicial de consolidação. Assim, a existência de um sistema de controlo do ensaio que pode ser programado para conduzir um ensaio não convencional como o apresentado exatamente como planeado por períodos de vários dias ou, no caso de areias densas, por semanas, permite realizar ensaios que doutra forma dificilmente poderiam ser executados com sucesso. De facto, não sendo este um ensaio tipicamente realizado num laboratório comercial, o seu controlo beneficia do facto de o sistema de controlo e aquisição ser suficientemente flexível para permitir implementar quaisquer condições de ensaio pretendidas.

4.3 – Contributo do desenvolvimento de sistemas particulares de preparação de amostras

A preparação de amostras de areia para diferentes tipos de ensaios elementares com diferentes densidades relativas constitui um desafio em que as questões da repetibilidade e da reprodutibilidade são fundamentais. De facto, é importante criar amostras idênticas no mesmo equipamento de ensaio por um investigador assim como poder comparar resultados de diferentes tipos de ensaios realizados por diferentes investigadores. Coelho (2007) descreve os métodos mais utilizados para preparação de amostras de areia, considerando que o facto de o método da pluviação seca ser adotado com mais frequência em estudos de liquefação cíclica resulta do facto de este exibir maior repetibilidade e reprodutibilidade, sobretudo no ensaio de areias uniformes, mais suscetíveis à liquefação e onde a

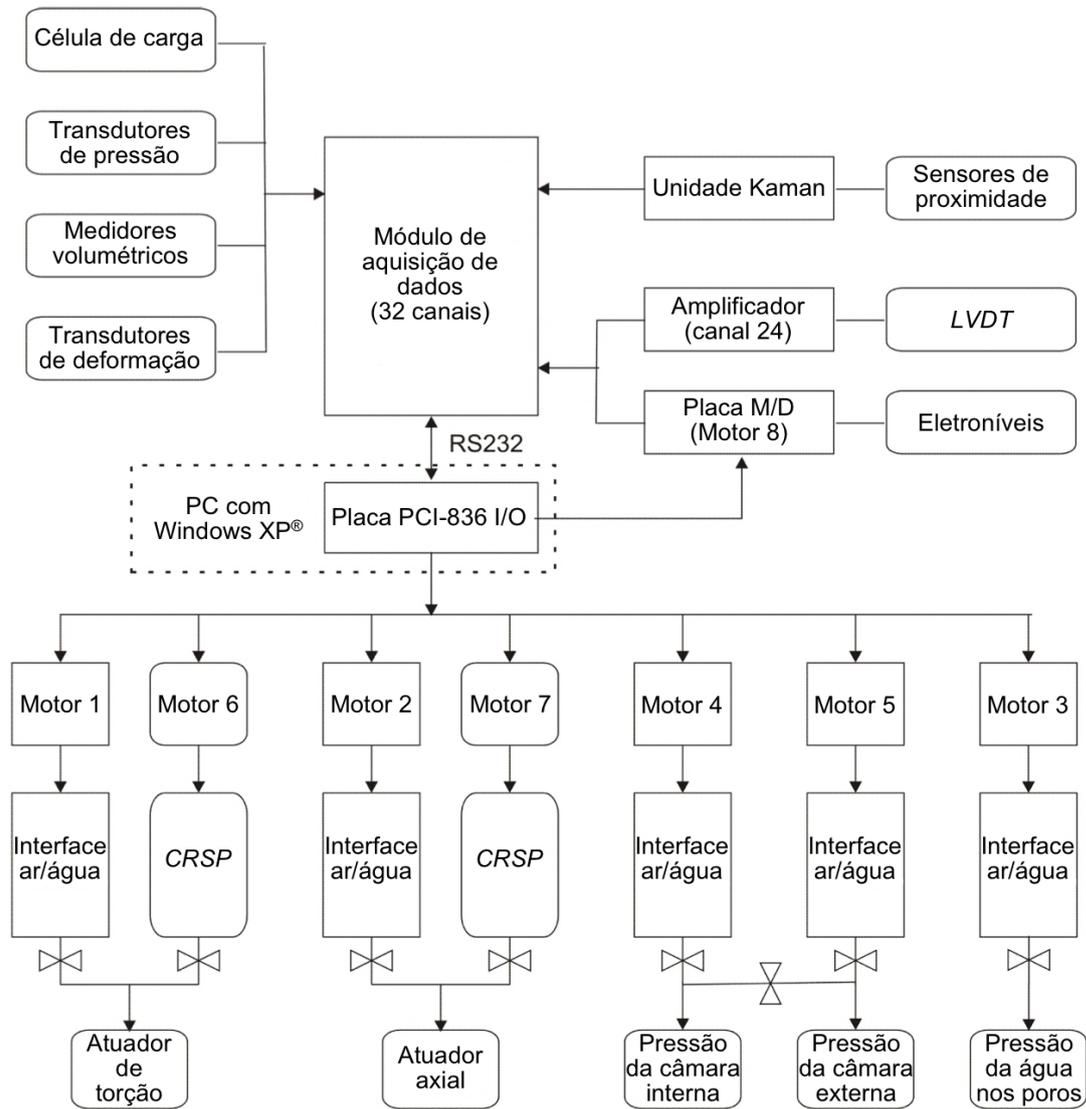


Fig. 32 – Sistema de controlo e aquisição automáticos de dados do HCA da UC (Santos, 2015).

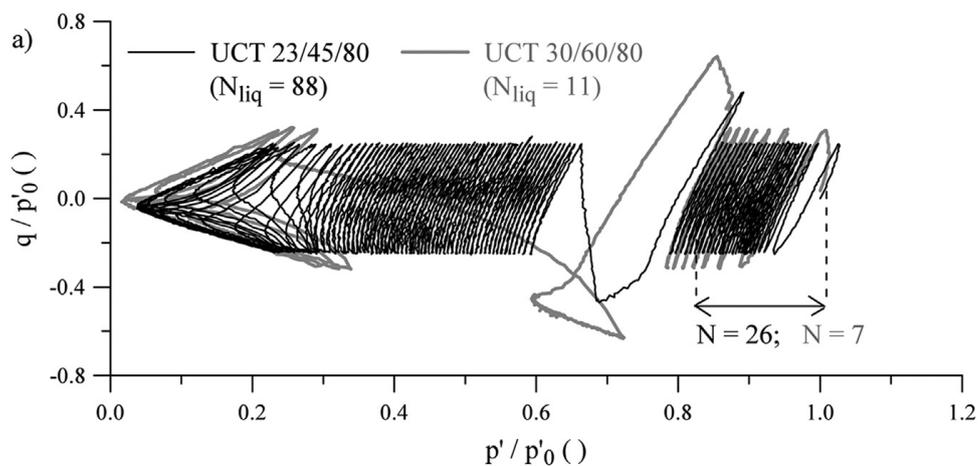


Fig. 33 – Comparação de caminhos de tensões obtidos em ensaios cíclicos não drenados de amplitude irregular realizados na SPC (Azeiteiro et al., 2017b).

questão da segregação de partículas é irrelevante. Além disso, e como o problema da liquefação é frequentemente investigado através de modelação física na centrífugadora, é necessário utilizar em ensaios elementares métodos de preparação das amostras que sejam comparáveis aos utilizados para preparar modelos físicos de dimensões muito superiores às dos ensaios elementares comuns, sejam estes manuais ou automatizados (Figura 34-a,b,c). Tendo em conta as dimensões e a geometria das amostras utilizadas em ensaios elementares, é necessário desenvolver sistemas de pluviação particulares adaptados a cada caso tipo de equipamento utilizado (Figura 34-d,e). Se no caso das amostras cilíndricas para ensaio na SPC a deposição da areia resulta em geral em amostras uniformes se o fluxo de areia e a altura de quedas forem mantidos sensivelmente constantes durante o processo (Figura 34-d), já no caso do cilindro oco o processo tem maior complexidade e exige um fluxo de areia em forma de coroa criado por um sistema de placas perfuradas instaladas na base de um contentor de areia (Figura 34-e,f). Note-se que em qualquer dos casos, o processo de preparação de amostras tem de ser cuidadosamente calibrado em função do fluxo e alturas de queda utilizadas.

A fim de avaliar a comparabilidade dos resultados, são regularmente realizados ensaios em condições, nomeadamente investigadores, dimensões de amostras e equipamentos de ensaios, distintas. A Figura 35 compara os caminhos de tensões efetivas obtidos em amostras de areia de

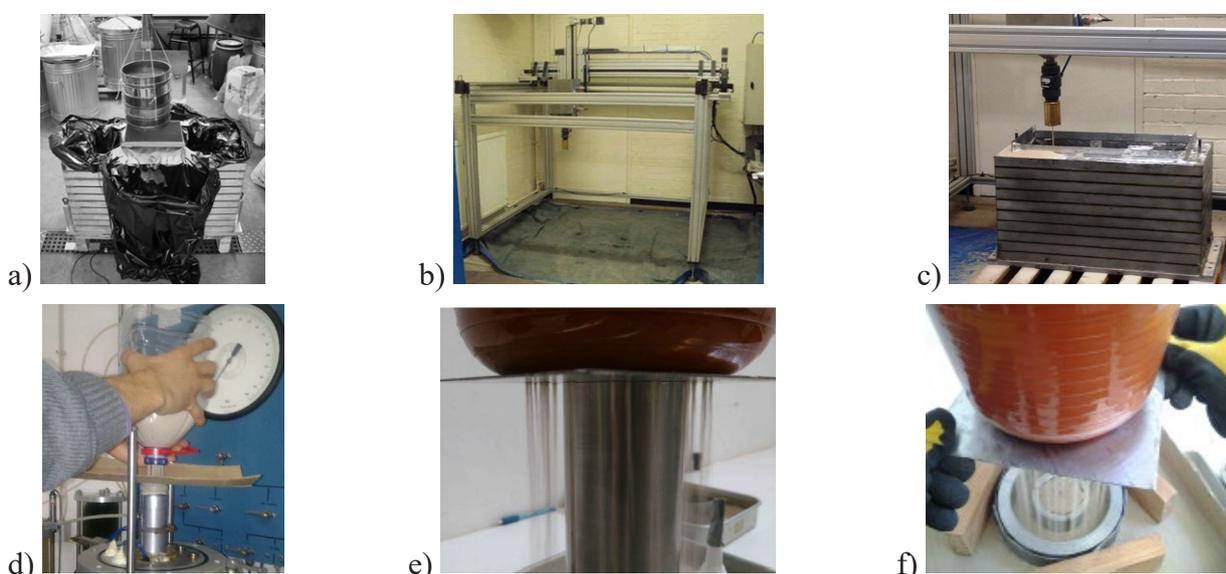


Fig. 34 – Sistemas de pluviação de areia utilizados em: a) preparação manual de modelos físicos (Coelho, 2007); b-c) preparação automatizada de modelos físicos (Marques et al., 2014, Marques, 2021); d) preparação de amostras na SPC (Azeiteiro, 2020); e-f) preparação de amostras no HCA (Santos, 2015).

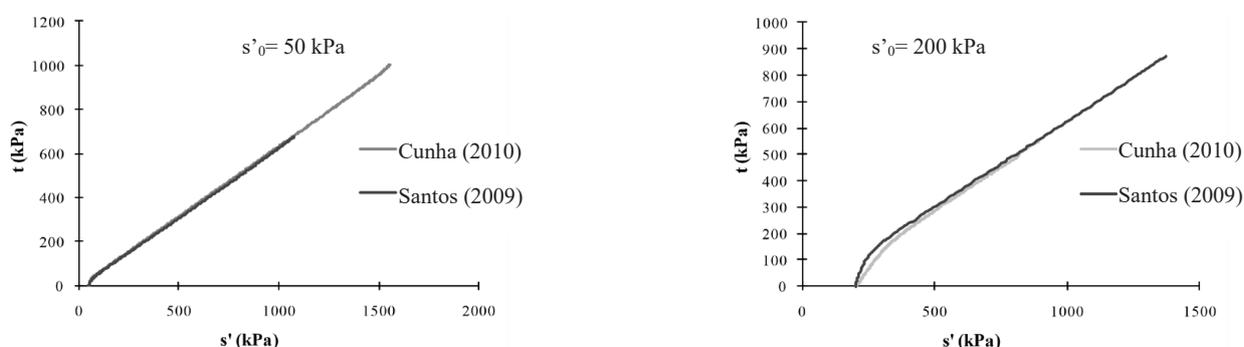


Fig. 35 – Comparação do comportamento exibido por amostras densas de Areia de Coimbra em compressão triaxial ensaiadas num triaxial com amostras com $\phi=70$ mm por Santos (2009) com as ensaiadas numa SPC com amostras com $\phi=38$ mm por Cunha (2010).

Coimbra densa, para dois níveis de tensão de consolidação, em compressão triaxial não drenada por dois investigadores distintos e com amostras com geometrias bastante diferentes. A Figura 36, por sua vez, compara resultados de ensaios monotónicos de compressão realizados sobre amostras semelhantes na prensa triaxial (TX) e no HCA para uma tensão de consolidação mais elevada. Em todos os casos, é atingida uma semelhança grande entre os resultados obtidos, com exceção da zona das grandes deformações, onde os efeitos dos erros associados à deformação das amostras e sua medição resultam em diferenças perfeitamente justificáveis.

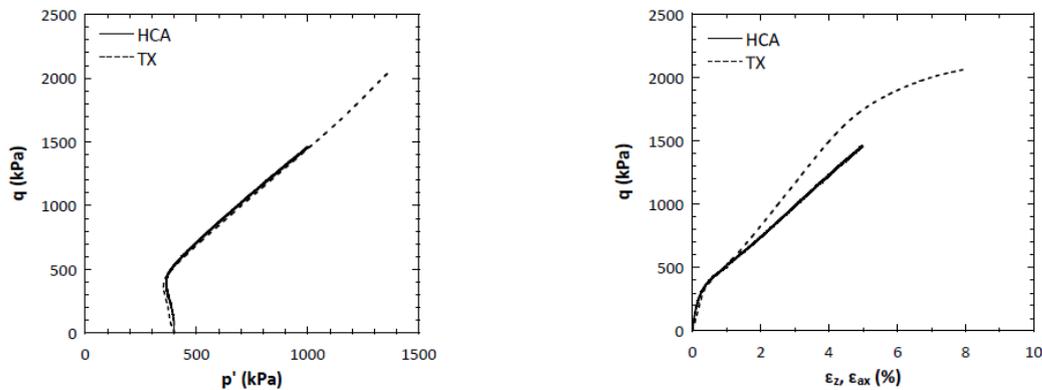


Fig. 36 – Comparação de ensaios monotónicos de compressão realizados sobre amostras densas de Areia de Coimbra na prensa triaxial (TX) e no HCA para $p'_0 = 400$ kPa (Santos, 2015).

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme explanado nos capítulos anteriores, os três Laboratórios de Geotecnia dos Departamentos de Engenharia Civil das Universidades do Porto, de Lisboa e de Coimbra, tiveram um desenvolvimento notável ao longo dos últimos trinta anos relativamente às valências em equipamento e metodologia de ensaios na perspetiva da caracterização do comportamento mecânico de solos granulares, destacando a matriz preferencial destas competências laboratoriais focadas no ensino e investigação avançados e que potenciaram intensas colaborações entre os grupos de investigação em Geotecnia destas Universidades.

Para evidenciar estas competências, destaca-se o trabalho de investigação colaborativa entre as três instituições onde a combinação de técnicas e equipamentos de ensaio complementares permitiu a caracterização de aspetos relevantes da Areia de Coimbra, através de um conjunto variado de ensaios laboratoriais, conforme mostra o Quadro 2.

A Figura 37 mostra a linha de estados críticos determinada a partir dos ensaios monotónicos realizados nas três universidades, em que se constata alguma dispersão sobretudo para tensões de confinamento mais baixas. Com efeito, o erro inerente à determinação do índice de vazios inicial da amostra não é desprezável. Por exemplo, se uma amostra de 140 mm de altura tiver um desvio de 1mm na altura, o desvio no índice de vazios será de cerca de 0,015. Se o desvio for no raio, o desvio no índice de vazios já será de cerca de 0,05. Este fato, pode ser evitado recorrendo a amostras com maiores dimensões. Por outro lado, pode acontecer que nem todos os pontos correspondam ao estado crítico, mas apenas ao estado de tensão-deformação final do ensaio.

A inclinação da linha dos estados críticos (λ) obtida de 0,037 é menor do que os valores típicos para areias fluviais. Para além das considerações atrás referidas, salienta-se que a justificação mais provável é a de que a linha dos estados críticos é definida por uma curva em vez de uma reta, e λ aumenta progressivamente, aproximando-se de uma linha reta apenas para tensões de confinamento mais elevadas.

Quadro 2 – Ensaio realizados sobre a Areia de Coimbra

Designação do ensaio	Lab.	Tipo	Condições iniciais	
			D_r (%)	σ'_0 (kPa)
OC 40	FCTUC	Edométrico	40, 80	--
OC 80				--
DMTC 40/50, DMTC 40/100, DMTC 40/200, DMTC 40/400	FCTUC IST	Triaxial monotónico de compressão (drenado)	40	50, 100, 200, 400
DMTC 50/20, DMTC 50/50, DMTC 5/100, DMTC 50/400, DMTC 20/1000, DMTC 50/10000	FEUP	Triaxial monotónico de compressão (drenado)	5, 20, 50	20, 50, 100, 400, 1000, 10000
UMTC 25/100, UMTC 36/200, UMTC 80/400	FEUP	Triaxial monotónico de compressão (<i>stress path</i> , não drenado)	25, 36, 80	100, 200, 400
UMTC 25/100, UMTC 36/200	FEUP	Triaxial monotónico de compressão (<i>stress path</i> , não drenado)	25, 36	100, 200
UMTC 40/50, UMTC 40/100, UMTC 40/200, UMTC 40/400	FCTUC IST	Triaxial monotónico de compressão (não drenado)	40	50, 100, 200, 400
DMTC 80/50, DMTC 80/100, DMTC 80/200, DMTC 80/400	FCTUC IST	Triaxial monotónico de compressão (drenado)	80	50, 100, 200, 400
UMTC 80/50, UMTC 80/100, UMTC 80/200, UMTC 80/400	FCTUC IST	Triaxial monotónico de compressão (não drenado)	80	50, 100, 200, 400
UMHCAC 40/50, UMHCAC 40/100, UMHCAC 40/200, UMHCAC 40/400	FCTUC	Triaxial monotónico de compressão em coluna ôca (não drenado)	40	50, 100, 200, 400
BE 40, BE 80	FEUP	Bender/Extender elements	40, 80	50, 100, 200, 400
UTS 20/50, UTS 20/200	IST	Torção cíclica (não drenado)	20	50, 200
UCT 30/20	FEUP	Triaxial cíclico (não drenado)	30	20
UCT 40/100	FCTUC	Triaxial cíclico (não drenado)	40	100

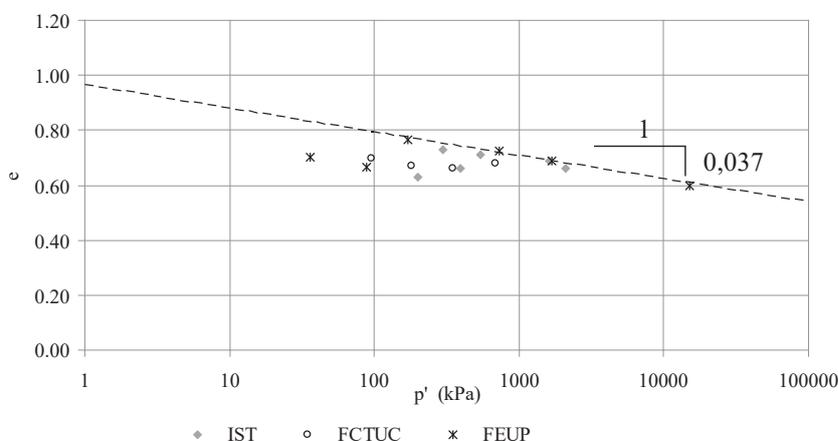


Fig. 37 –Areia de Coimbra: Linha dos estados críticos (adaptado de Santos et al., 2012).

A Figura 38 mostra os resultados obtidos nos ensaios cíclicos em que se procura analisar a suscetibilidade à liquefação da Areia de Coimbra, através da relação entre o parâmetro CRR que define a razão da resistência cíclica e o número de ciclos N que induz liquefação. Os ensaios de torção cíclica foram realizados para tensões de confinamento de 50 e 200 kPa e compactidade relativa $D_r=20\%$. Pode-se constatar que as linhas para $p'=50\text{kPa}$ e $p'=200\text{kPa}$ são quase paralelas, ou seja, a razão da resistência cíclica diminui com o aumento da tensão de confinamento. Os resultados obtidos nos ensaios triaxiais cíclicos também corroboram a mesma tendência.

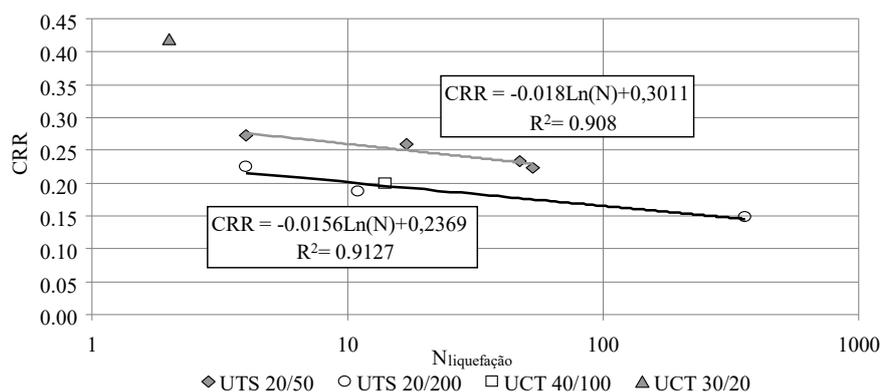


Fig. 38 – Areia de Coimbra: CRR em função de N (adaptado de Santos et al., 2012).

Nos últimos anos da década de oitenta do século passado, Portugal conheceu, a par dum crescimento económico significativo associado à entrada na comunidade europeia, a solidificação da área científica da geotecnia dos departamentos de engenharia civil das universidades com maior tradição de formação de técnicos superiores e pós-graduados. Em paralelo com a criação de novos cursos de mestrado e estudos doutorais, sentiu-se a necessidade de criar estruturas laboratoriais que servissem o ensino e a investigação sobre as propriedades dos maciços terrosos e rochosos implicados por estruturas cada vez mais desafiantes. A internacionalização das colaborações dos responsáveis por este desígnio permitiu formatar as valências destas estruturas ao mais alto nível, propondo candidaturas aos fundos estruturais que nesse momento foram disponibilizados e que foram aprovados pela sua qualidade. Logo se iniciou um ciclo de investigação experimental que viria a dar frutos em monografias e publicações relevantes, que fundamentariam ainda mais colaborações que fortaleceram partilha acrescida de conhecimento. Paralelamente, foi possível prestar serviços experimentais qualificados solicitados pelos diferentes sectores responsáveis pelas infraestruturas de engenharia construídas desde os primeiros anos. Seria difícil fazer uma descrição de quanto estes três laboratórios mudaram o panorama da Geotecnia em Portugal nos últimos trinta anos, tendo por isso, os autores deste artigo decidido limitar algumas destas valências e em especial a da caracterização de solos siltosos e arenosos não plásticos. Com esta "pincelada" espera-se abrir o interesse do leitor à leitura de publicações que se referiram e outras que delas decorrem.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, M. (2012). *Caracterização e Modelação de Comportamento Dinâmico e Cíclico de Misturas de Solo-Cimento para Infraestruturas de Transportes*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Amaral, M.; Viana da Fonseca, A., Arroyo, M.; Cascante, G.; Carvalho, J.M. (2011) *Compression and shear wave propagation in cemented-sand specimens*. Géotechnique Letters, 1(3): 79–84, ICE.
- Amaral, M.; Rios, S.; Viana da Fonseca, A. (2012). *Yielding in isotropic compression of Porto silty sand*. Acta Geotechnica Slovenica, 1: 31-45 (http://www.fg.uni-mb.si/journal-ags/pdfs/AGS_2012-1_article_2.pdf)
- Arroyo, M.; Pineda, J.; Romero, E. (2010). *Shear Wave Measurements Using Bender Elements in Argillaceous Rocks*. Geotechnical Testing Journal, 33(6):1-10, ASTM.
- Astuto, G. (2021). *Bio-Induced Partial Saturation as a Liquefaction Mitigation Technique*. Doctorate thesis in Struct., Geotech Eng., Seismic Risk. University of Napoli Federico II.

- Azeiteiro, R.J.N. (2020). *Numerical simulation of liquefaction-related phenomena*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Azeiteiro, R.J.N.; Coelho, P.A.L.F.; Taborda, D.M.G.; Grazina, J.C.D. (2017a). *Critical State-Based Interpretation of the Monotonic Behavior of Hostun Sand*. J. of Geotech. and Geoenviron. Eng., 143 (5): 1-14, 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001659, ASCE.
- Azeiteiro, R.J.N.; Coelho, P.A.L.F.; Taborda, D.M.G.; Grazina, J.C.D. (2017b). *Energy based evaluation of liquefaction potential under non-uniform cyclic loading*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 92: 650-665. Elsevier.
- Bedin, J. (2010). *Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração*. Tese de doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Bedin, J.; Schnaid, F.; Viana da Fonseca, A.; Costa-Filho, L. (2012). *Gold tailings liquefaction using critical state soil mechanics concepts*. Géotechnique, 62(3): 263–267. ICE.
- Bishop, A.W.; Wesley, L.D. (1975). *A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing*. Geotechnique, 25: 657–670. ICE.
- Brignoli, E.G.M.; Gotti, M.; Stokoe, K.H.II (1996). *Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers*. Geotechnical Testing Journal, 19(4): 384-397. ASTM.
- Camacho-Tauta, J. (2011). *Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- Camacho-Tauta, J.; Santos, J.A.; Ferreira, C.; Viana da Fonseca, A. (2008a). *Moving Windows Algorithm to reduce uncertainties in bender element testing*. 11º Congresso Nacional de Geotecnia, Universidade de Coimbra, 1: 149-156. SPG, Lisboa.
- Camacho-Tauta, J.; Santos, J.A.; Viana da Fonseca, A. (2008b). *Evaluation of the small-strain shear modulus using two bender-receivers and a controlled external source*. 4th Int. Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Atlanta, 2: 703-709. IOS Press, Amsterdam.
- Camacho-Tauta, J.; Santos, J.A.; Viana da Fonseca, A. (2010a). *Strain level and vibration frequency in resonant-column tests*. XIII Congreso Colombiano de Geotecnia - VII Seminario Colombiano de Geotecnia. 18:1-9, Manizales, Colombia. ISBN 978-958-98770-2-9.
- Camacho-Tauta, J.; Santos, J.A.; Viana da Fonseca, A. (2010b). *Control, acquisition and analysis of resonant-column testing using an automated program*. 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Universidade do Minho, in CD-Rom: 1757-1766. SPG, Lisboa.
- Camacho-Tauta, J.; Santos, J.A.; Viana da Fonseca, A. (2011a). *Control, acquisition and analysis of resonant-column testing using an automated program*. Proc. IS' Seoul, Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials, 1: 250-257, IOS Press.
- Camacho-Tauta, J.; Cascante, G; Santos, J.A.; Viana da Fonseca, A. (2011b). *Measurements of shear wave velocity by resonant-column test, bender element test and miniature accelerometers*. Proc. 15th Pan-Am CGS Geotechnical Conference, paper no. 949, in CD-Rom.
- Camacho-Tauta, J.; Reyes-Ortiz, O.J.; Santos, J.A. (2012). *Evaluation of the frequency effects on the shear wave velocity of saturated sands*. 15th World Conference on Earthquake Engineering, paper 30699, 10p. SPES, Lisboa (ISBN: 978-1-63439-651-6)
- Camacho-Tauta, J.; Santos, J.A.; Viana da Fonseca, A. (2014). *Two-Bender Receivers Frequency Domain Analysis in Resonant-Column Tests*. Advances in Soil Dynamics and Foundations Engineering. Geotechnical Special Publication no. 240: 72-82. ASCE.

- Camacho-Tauta, G.; Cascante, G.; Viana da Fonseca, A.; Santos, J. A. (2015). *Evaluation of the response of a BE system – Time and frequency domains*. *Géotechnique*, 65(7): 548–562. ICE.
- Camacho-Tauta, G.; Ali, H.; Cascante, G.; Viana da Fonseca, A. (2017). *Experimental and numerical observations of the frequency domain method in bender element testing*, *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng.* 143 (2), DOI 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001603.
- Chembeze, S.; Viana da Fonseca, A. (2008). *Verificação da saturação de provetes de solos tropicais arenosos com recurso à utilização de ondas sísmicas em laboratório*. 5º Cong. Luso-Moçambicano de Engenharia, CD-Rom. Refª 17A028. Ordem Engºs Moçambique, Maputo.
- Chitas, P.; Santos J.A.; Lopes, I. (2012). *A three-dimensional extension of the Ramberg-Osgood model - comparison with other formulations*. 15th World Conference on Earthquake Engineering, paper 23211, 10p. SPES, Lisboa (ISBN: 978-1-63439-651-6)
- Coelho, P.A.L.F. (2000). *Caracterização geotécnica de solos moles: estudo do local experimental da Quinta do Foja (Baixo Mondego)*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Coelho, P.A.L.F. (2007). *In Situ Densification as a Liquefaction Resistance Measure for Bridge Foundations*. PhD Thesis, Cambridge University Engineering Department, UK.
- Consoli, N. C.; Viana da Fonseca, A.; Rios Silva, S.; Cruz, R. C.; Fonini, A. (2012) *Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils*, *Géotechnique*, 62 (2): 177–183. ICE.
- Cruz, R.C. (2008). *Influência de Parâmetros Fundamentais na Rigidez, Resistência e Dilatância de uma Areia Artificialmente Cimentada*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Cunha, M.I.A.B.A. (2010). *Caracterização Laboratorial do Comportamento de uma Areia de Coimbra sob Carregamento Cíclico*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Delgado, B. G. (2019). *Geomecânica de um agregado siderúrgico inerte como material alternativo para lastro de vias férreas do tipo Heavy Haul*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Diaz Duran, F. A. (2020). *Excitation Force and Frequency Effects in Wave-Based Techniques for the Characterization of Geomaterials at Different Scales*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade de Waterloo, UWSpace.
- Dourado, K. C. de A. (2012). *Caracterização Geotécnica de um Solo Residual de Granito do Porto em Condições Não Saturadas e Modelação do Comportamento de Estacas Moldadas nestes Solos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Esteves, E. F. M. C. E. (2013). *Aluvões Silto-Argilosos Moles de Portugal. Parametrização para Dimensionamento de Estruturas Geotécnicas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Faria, N.V.; Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2005). *Processo de saturación de ensayos triaxiales*. *Geotecnia*, 104: 31 – 42. SPG, Lisboa.
- Ferreira, C. (2009). *The use of seismic wave velocities in the measurement of stiffness of a residual soil*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Ferreira, C.; Viana da Fonseca, A. (2002). *Aplicação da Técnica de Bender Elements para Avaliação da Qualidade de Amostragem em Solos residuais*. Atas do XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e 1º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, S. Paulo, Brasil, 20 a 24 de Outubro de 2002. ABMS, S. Paulo.

- Ferreira, C.; Viana da Fonseca, A.; Santos, J.A. (2007). *Comparison of simultaneous bender elements and resonant column tests on Porto residual soil*. Geotechnical Symposium in Rome on Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis, Ling, Callisto, Leshchinsky e Koseki (Eds.), XXVI: 523-535. Springer, Berlin.
- Ferreira, C.; Viana da Fonseca, A.; Nash, D. (2011). *Shear wave velocities for sample quality assessment on a residual soil*. Soils and Foundations. 51(4): 683-692. Special Issue on “Deformation Characteristics of Geomaterials”, IS-Seoul 2011.
- Ferreira, C.; Viana da Fonseca, A.; Ramos C.; Saldanha, A. S.; Amoroso, S.; Rodrigues, C. (2019). *Liquefaction susceptibility assessment based on in situ geotechnical and geophysical characterisation of a pilot site in the greater Lisbon area*. Bulletin of Earthquake Engineering, 18: 109-138. Springer Nature, London.
- Ferreira, C.; Díaz-Durán, F.; Viana da Fonseca, A.; Cascante, G. (2021). *New approach to concurrent Vs/Vp measurements using bender elements*. Geotechnical Testing Journal (GTJ-2020-0207.R1 - aceite para publicação). ASTM.
- Foti, S.; Lai, C. G.; Lancellotta, R. (2002). *Porosity of fluid-saturated porous media from measured seismic wave velocities*. Géotechnique, 52, 359–373, ICE.
- Gomes Correia, A.; Santos, J.A. (1997). *Caracterização em laboratório de uma areia no domínio das pequenas e grandes deformações*. 6º Congresso Nacional de Geotecnia, Instituto Superior Técnico. 1: 415-424, SPG, Lisboa.
- Gomes Correia, A.; Santos, J.A.; Barros, J.M.; Niyama, S. (2001). *An approach to predict shear modulus of soils in the range of 10⁻⁶ to 10⁻² strain levels*. 4th Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Eng. and Soil Dynamics, S. Diego, California, paper no. 1.22.
- Gomes, R.C.; Santos, J.A.; Modaressi, A.; Lopez-Caballero, F. (2016). *Validation of a strategy to predict secant shear modulus and damping of soils with an elastoplastic model*. KSCE Journal of Civil Engineering. 20(2): 609-622. Seoul.
- Greening, P.D.; Nash, D.F.T. (2004). *Frequency domain determination of G₀ using bender elements*, Geotechnical Testing Journal, 27(3): 1-7. ASTM.
- Guedes, S. B. (2013). *Estudo do Desempenho Mecânico de Um Solo Cimento Microreforçado Com Fibras Sintéticas Para Uso Como Revestimento Primário Em Estradas Não Pavimentadas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Hight D.W.; Gens A.; Symes M.J. (1983). *The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils*. Géotechnique 33 (4): 355-383. ICE.
- Ismail, M.; Sharma, S.S.; Fahey, M. (2005). *A small true triaxial apparatus with wave velocity measurement*. Geotechnical Testing Journal, 28(2): 1-10. ASTM.
- Laranjo, M.R.L.L. (2013). *Argilas Miocénicas de Lisboa. Parametrização para o Dimensionamento de Estruturas Geotécnicas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Lings, M.L.; Greening, P.D. (2001). *A novel bender/extender element for soil testing*. Géotechnique, 51(8): 713-717. ICE.
- Lourenço, J.C.; Santos, J.A.; Pinto. P. (2017). *Hypoelastic UR-free model for soils under cyclic loading*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 97: 413-423. Elsevier, Amsterdam.

- Marques A.S.P.S (2021). *Centrifuge and Numerical Modelling of Seismic Liquefaction Effects and Mitigation in Shallow Foundations*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal (a submeter).
- Marques A.S.P.S.; Coelho P.A.L.F.; Haigh S; Madabhushi G. (2014). *Centrifuge Modeling of Liquefaction Effects on Shallow Foundations*. Seismic Evaluation and Rehabilitation of Structures. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Ilki A., Fardis M. (eds), 26: 425-440. Springer, Berlim.
- Marques, F. (2011). *Análise do potencial de liquefação de areias com finos*. Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- Marques, F.; Santos J.A.; Gomes, R.C. (2012a). *Coimbra sand – influence of non-plastic fines in liquefaction resistance*. 15th World Conference on Earthquake Engineering, paper 19523, 10p. SPES, Lisboa (ISBN: 978-1-63439-651-6)
- Marques, F.; Santos, J.A.; Gomes, R.C. (2012b). *Influência de finos não plásticos na resistência à liquefação da areia de Coimbra. Ensaios e modelação numérica*. 13^o Congresso Nacional de Geotecnia, IST/LNEC, CD-Rom, Artigo 177. SPG, Lisboa.
- Marques, F.; Santos, J.A.; Gomes R.C., (2012c). *Influência de finos não plásticos na resistência à liquefação da areia de Coimbra*. 13^o Congresso Nacional de Geotecnia, Encontro de Jovens Geotécnicos. IST/LNEC, Lisboa, CD-Rom, artigo 119. SPG, Lisboa.
- Molina-Gómez, F.; Ramos, C.; Ferreira, C.; Viana da Fonseca, A. (2020). *Performance of Gel-Push sampling in liquefiable soils*, Géotechnique Letters, 10: 1–6. ICE.
- Motta, M. F. B. (2016). *Caracterização Físico-Hídrico-Estrutural e Efeito do Aumento da Pressão do Ar na Resistência de Solos Não Saturados*. Tese de Doutoramento, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.
- Panico, A. F. (2018). *Modelling the Long Term Cyclic Behaviour of Porto Silty-Sand Stabilised with Cement*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Pereira, C.; Gomes Correia, A.; Ferreira, C.; Santos, J.A.; Santos, J. (2015). *Measurement of shear modulus using bender elements and resonant-column*. Proc. XV Pan-American Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng., Ed. Manzanal, A.O. Sfriso, 120-129. Buenos Aires.
- Ramos, C. (2021). *Modelling Sand Instability within the Framework of Critical State Soil Mechanics*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Ramos, C.; Viana da Fonseca, A.; Oblak, A.; Coop, M.R. (2019). *Cyclic simple shear and triaxial tests on Lisbon Region liquefiable sands*. Proc. 7ICEGE, Rome. Earthquake Geotech. Eng. Prot. Devel. of Environ. and Constr., Ed. F. Silvestri e N. Moraci, 4: 4654-4661. CRC.
- Ramos, R.C. (2018). *Caracterização no hollow cylinder apparatus do comportamento cíclico da areia de Hostun*, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.
- Raposo, N. (2016). *Deposição de Rejeitados Espessados. Caracterização Experimental e Modelação Numérica*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Reid, D.; Fourie, A.; Ayala, J. L.; Dickinson, S.; Ochoa-Cornejo, F.; Fanni, R.; Garfias, J.; Viana da Fonseca, A.; Ghafghazi, M.; Ovalle, C.; Riemer, M.; Rismanchian, A.; Olivera, R.; Suazo, G. (2020). *Results of a critical state line testing round robin programme*. Géotechnique 0 0:0, 1-15. <https://doi.org/10.1680/jgeot.19.P.373>. ICE.
- Rios, S. (2011). *A General Framework for the Geomechanical Characterisation of Artificially Cemented Soil*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Porto.

- Rios, S.; Cristelo, C.; Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2017). *Stiffness Behavior of Soil Stabilized with Alkali-Activated Fly Ash from Small to Large Strains*. International Journal of Geomechanics: 17(3), 1-12. ASCE.
- Robertson, P. (2016). *Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system, an update*. Can. Geotech. J., 53(12): 1910-1927. Can. Science Pub., Ottawa.
- Robertson, P.; Viana da Fonseca, A.; Ulrich, B.; Coffin, J. (2017). *Characterization of unsaturated mine waste: a case history*. Can. Geotech. J., 54(12): 1752-1761. Can. Science Pub., Ottawa.
- Saldanha, A. S.; Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2018). *Microzonamento de suscetibilidade à liquefação: caso de estudo no Vale Inferior do Tejo*. Geotecnia 142: 07-34. SPG, Lisboa
- Santos, J.A. (1999). *Caracterização de solos através de ensaios dinâmicos e cíclicos de torção. Aplicação ao estudo do comportamento de estacas sob ações horizontais estáticas e dinâmicas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- Santos, J.A.; Gomes Correia, A. (2000). *Shear modulus of soils under cyclic loading at small and medium strain level*. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, paper ID 0530. Ed. Upper Hutt, N.Z.: New Zealand Society for Earthquake Engineering.
- Santos, J.A.; Gomes Correia (2001). *Reference threshold shear strain of soil. Its application to obtain an unique strain-dependent shear modulus curve for soil*. 15th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Turkey, 1: 267-270. Balkema, Lisse.
- Santos, J.A.; Camacho-Tauta, J.; Parodi, M.; Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2007). *Use of random vibrations to measure stiffness of soils*. Proc. 2nd Int. Conf. on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures - EVACES'07, 1169-1178. Ed. Álvaro Cunha e Elsa Caetano, Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto.
- Santos, J.A.; Gomes Correia, A. (2002a). *Distorção limite de referência. Sua utilidade para o estabelecimento de uma curva única de degradação do módulo de distorção do solo – 1^a parte*. Geotecnia, 95: 99-110. SPG, Lisboa.
- Santos, J.A.; Gomes Correia, A. (2002b). *Distorção limite de referência. Sua utilidade para o estabelecimento de uma curva única de degradação do módulo de distorção do solo – 2^a parte*. Geotecnia, 95: 111-120. SPG, Lisboa.
- Santos, J.A.; Gomes Correia, A.; Fialho Rodrigues, L. (1999). *Comparison of laboratory and field shear modulus of St^a Iria de Azóia Clay*. XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguaçu, Brasil, 1: 173-178. ABMS, São Paulo.
- Santos, J.A.; Gomes Correia, A.; Modaressi, A.; Lopez-Caballero, F.; Gomes, R.C. (2003). *Validation of an elastoplastic model to predict secant shear modulus of natural soils by experimental results*. 3rd IS on Deformation Characteristics of Geomaterials, Lyon, 1057-1061.
- Santos J.A.; Gomes, R.C.; Marques, F.; Lourenço, J.C.; Coelho, P.A.; Azeiteiro, R.; Marques, V.; Santos, L.; Viana da Fonseca, A.; Soares, M.; Taborda, D. (2012). *Coimbra sand – round robin tests to evaluate liquefaction resistance*. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, paper 27005, 10p. SPES, Lisboa (ISBN: 978-1-63439-651-6)
- Santos, J.A.; Santos, João N.; Ferreira, Cristiana; Pereira, C.; Gomes Correia, A. (2015). *Assessment of shear modulus by different seismic wave-based techniques*. 6th Int. Symp. Deformation Charact. of Geomaterials, Buenos Aires, Ed. Rinaldi, Zeballos, Clariá, 374-381. Millpress.

- Santos, J.A.; Lourenço, J.C.; Modaressi, A. (2017). *Calibration of hardening rules of an elastoplastic model to simulate experimental behaviour of natural soils*. Proc. of the 19th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Korea. CD-Rom, 843-846.
- Santos, L.M.A. (2015). *Caracterização do comportamento mecânico da areia de Coimbra sob ações generalizadas*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.
- Santos, L.N.L. (2009). *Comportamento da Areia de Coimbra sob Carregamento Monotónico*, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.
- Schnaid, F.; Bedin, J.; Viana da Fonseca, A.; Costa-Fillho, L. de M. (2013). *Stiffness and strength governing the static liquefaction of tailings*, Journal of Geotech. and Geoenviron. Engin., 139(12), 2136–2144. ASCE.
- Sladen, J. A.; Handford, G., (1987). *A potential systematic error in laboratory testing of very loose*. Can. Geotech. J, 24(3), p. 462–466.
- Soares, M.; Viana da Fonseca, A. (2016). *Factors Affecting Steady State Locus in Triaxial Tests*. Geotechnical Testing Journal. 39(6): 1056-1078. ASTM.
- Soares, M. (2014). *Evaluation of Soils Liquefaction Potential Based on Laboratory Data - Major Factors and Limit Boundaries*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Teixeira, M. (2021). *Mass movement processes in the Southwest Portuguese Continental Margin during the Late Pleistocene-Holocene: a multidisciplinary approach for volume quantification, estimation of recurrence times and hazard implications*. Tese de Doutoramento em Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Toll, D.G. (1993). *Triax: User manual (v3.3)*. Geotechnical Systems Group, University of Durham, Durham.
- Toll, D.G. (2002). *Triax: User manual (v4.2)*. Geotechnical Systems Group, University of Durham, Durham.
- Topa Gomes, A. (2009). *Poços Elípticos pelo Método de Escavação Sequencial da Vertical – o Caso do Metro do Porto*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Viana da Fonseca (1994). *Ensaio CPTU com piezocone eléctrico nas margens Norte e Sul do rio Tejo Nova ponte rodoviária entre Montijo e Lisboa (Alcochete/Moscavide)*. Trab. p. Teixeira Duarte, Eng. e Const., SA. Laboratório de Geotecnia da FEUP, Instituto da Construção.
- Viana da Fonseca, A. (1995). *Influência do sistema de medição das deformações em provetes de ensaio triaxial na avaliação da rigidez constitutiva de materiais granulares rijos*. 5^o Congresso Nacional de Geotecnia, 1: 353-374, Universidade de Coimbra. SPG, Lisboa.
- Viana da Fonseca, A. (1996). *Geomecânica dos Solos Residuais do Granito do Porto. Critérios para Dimensionamento de Fundações Directas*. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Viana da Fonseca, A. (1998). *Identifying the reserve of strength and stiffness characteristics due to cemented structure of a saprolitic soil from granite*. Proc. “2nd International Symposium on Hard Soils – Soft Rocks – Naples, 1: 361-372. Balkema, Rotterdam.
- Viana da Fonseca, A. (2007). *Relato da experiência Portuguesa em ensaios de carga em estacas. Parte I: acções verticais*. Geotecnia, 111: 5-57 (número especial). SPG, Lisboa.
- Viana da Fonseca, A. (2012). *Application of in situ testing in tailing dams, emphasis on liquefaction: case-history*. Workshop on Practical Applications ISC’4. Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, 1: 181-203. A. Balkema, CRC, Taylor & Francis, London, UK.

- Viana da Fonseca, A. (2013). *Liquefação de solos à luz da mecânica aplicada*. Geotecnia, 128: 3-35. SPG, Lisboa.
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2002). *Bender-elements como técnicas laboratoriais excelentes para avaliação de parâmetros geotécnicos referenciais*, 8º Congresso Nacional de Geotecnia, LNEC, Lisboa, I: 353-365. SPG, Lisboa.
- Viana da Fonseca, A.; Soares, M. (2012). *Effect of principal stress rotation on cyclic liquefaction*. Proc. II International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Eng., May, Taormina, Italy, ID 3.08, Ed. Soccodato e Maugeri (ISBN 9788855531788)
- Viana da Fonseca, A.; Matos Fernandes, M.; Silva Cardoso, A.; Barreiros Martins, J. (1994). *Portuguese experience on geotechnical characterization of residual soils from granite*, Proc. XIII Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng., Nova Deli, 1: 377-380. Balkema, Rotterdam
- Viana da Fonseca, A.; Carvalho, J.; Ferreira, C. (2005). *The use of shear wave velocities determined in Down-Hole (V_{svh}) and Cross-Hole (V_{shv}) tests for the evaluation of K_0* . Soils and Rocks 28 (3): 271-281. ABMS, São Paulo.
- 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), 91–107, ASTM.
- Viana da Fonseca, A.; Coop, M.R.; Fahey, M.; Consoli, N. (2011). *The interpretation of conventional and non-conventional laboratory tests for challenging geotechnical problems*. 'Deformation Characteristics of Geomaterials', 1: 84-119. IOS Press, Amsterdam.
- Viana da Fonseca, A.; Rios, S.; Amaral, M. (2013). *Structural anisotropy by static compaction*. Engineering Geology. 154: 89-97. Elsevier, Amsterdam.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., Soares, M., Klar, A. (2015a). *Improved laboratory techniques for advanced geotechnical characterization towards matching in situ properties*. 'Deformation Characteristics of Geomaterials', pp. 231-263, V.A. Rinaldi et al. (Eds.). IOS Press (doi:10.3233/978-1-61499-601-9-231A)
- Viana da Fonseca, A.; Soares, M.; Fourie, A. B. (2015b). *Cyclic DSS tests for the evaluation of stress densification effects in liquefaction assessment*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 75: 98-111. Elsevier, Amsterdam.
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C.; Ramos, C.; Molina-Gómez, F. (2019a). *The geotechnical test site in the greater Lisbon area for liquefaction characterisation and sample quality control of cohesionless soils*. AIMS Geosciences, 5(2): 325–343. USA.
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C.; Molina, F.; Ramos, C. (2019b). *Collection of high-quality samples in liquefiable soils using new sampling technique*. Proc. XVII European Conf. on Soil Mech. and Geotech Engin., Reykjavik, Iceland. doi: 10.32075/17ECSMGE-2019-0014.
- 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, submetido (Junho 2021: <https://www.mdpi.com/journal/geotechnics>).