

# QUALIDADE DE AMOSTRAS “INDEFORMADAS” EM SOLOS NÃO COESIVOS RECOLHIDAS COM PROCEDIMENTOS AVANÇADOS

## Quality of “undisturbed” samples of cohesionless soils collected with advanced procedures

Catarina Ramos<sup>a</sup>, Fausto Molina-Gómez<sup>a</sup>, Cristiana Ferreira<sup>a</sup> e António Viana da Fonseca<sup>a</sup>

<sup>a</sup> CONSTRUCT-GEO – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

**RESUMO** – Ao longo da última década, as técnicas de amostragem de solos têm evoluído no sentido de reduzirem o atrito na interface entre o amostrador e o solo, minimizando as perturbações e obtendo amostras de alta qualidade para caracterização laboratorial. No âmbito de um projeto de investigação focado no estudo da liquefação em Portugal (LIQ2PROEARTH) e um europeu mais global (LIQUEFACT), foi implementado um campo experimental nas zonas de Benavente e Vila Franca de Xira, no qual foram realizados diversos ensaios *in situ* (SPT, CPTu, DMT), com medição de ondas sísmicas (SCPTu e SDMT) em locais onde foram recolhidas amostras indeformadas. O presente trabalho apresenta a experiência com amostradores especialmente adaptados a condições difíceis, Dames & Moore e Gel-Push, em depósitos aluvionares granulares com suscetibilidade à liquefação. Os procedimentos de manuseamento e transporte adotados são descritos e o desempenho de cada metodologia é avaliada em termos de integridade material e estrutural. Assim, recorre-se a um método que permite comparar as velocidades das ondas distorcionais obtidas tanto em campo como em laboratório, aqui com recurso a *bender elements*. Ambos os amostradores mostraram ser competentes na extração de amostras de areias e areias siltsosas soltas de elevada qualidade.

**ABSTRACT** – Over the past decade, soil-sampling techniques have evolved in order to reduce friction in the interface between the sampler and the soil, minimizing soil disturbance and collecting high-quality samples for laboratory characterisation. Under research projects focused on liquefaction studies in Portugal (LIQ2PROEARTH) and in Europe (LIQUEFACT), an experimental site was implemented in the areas of Benavente and Vila Franca de Xira, where various in situ tests (SPT, CPTu, DMT), including seismic wave measurements (SCPTu and SDMT), were performed and undisturbed samples were collected. The present work presents the experience with samplers adapted to difficult conditions, Dames & Moore and Gel-Push, in granular alluvial deposits with susceptibility to liquefaction. The handling and transportation procedures adopted are described and the performance of each technique is evaluated based on the samplers’ recovery capacity. Subsequently, the quality of the samples collected is evaluated by comparing the shear wave velocities obtained in the field and in the laboratory, here using bender elements. Both samplers proved to be competent in extracting samples of loose sands and silty sands of high quality.

**Palavras-Chave** – Qualidade de amostragem, Dames & Moore, Gel-Push, velocidade de ondas distorcionais

**Keywords** – Sample quality, Dames & Moore, Gel-Push, sample quality, shear wave velocities

---

E-mails: catarinacorreiaramos@gmail.com (C. Ramos), fausto@fe.up.pt (F. Gómez), cristiana@fe.up.pt (C. Ferreira), viana@fe.up.pt (A. Fonseca)

ORCID: orcid.org/0000-0001-6679-8121 (C. Ramos), orcid.org/0000-0002-8831-0315 (F. Gómez), orcid.org/0000-0001-5998-6220 (C. Ferreira), orcid.org/0000-0002-9896-1410 (A. Fonseca)

## 1 – INTRODUÇÃO

Ao longo dos séculos, há registos de múltiplos fenómenos de liquefação associados a terremotos em Portugal. Alguns exemplos são o terremoto de 1531, com epicentro no Vale Inferior do Tejo, o de 1755 que destruiu larga maioria da cidade de Lisboa, e o terremoto de 1909 que destruiu a vila de Benavente (Jorge e Vieira, 1997), que provocaram danos significativos em edifícios e infraestruturas e foram responsáveis pela perda de muitas vidas humanas. Em todos estes eventos foram registadas claras evidências de liquefação. Para aprofundar o conhecimento sobre o fenómeno de liquefação em Portugal e a forma como se podem “protocolar” ferramentas e outros meios ajustados para avaliar substantivamente os danos induzidos por esse fenómeno à superfície, foram desenvolvidos dois projetos de investigação: o projeto nacional LIQ2PROEARTH (financiado pela FCT) e o projeto europeu LIQUEFACT (financiado pelo programa-quadro Horizon 2020). Neste âmbito, foi selecionado um campo experimental, após intensa avaliação dos elementos disponíveis sobre a história de eventos, estudos publicados e outros importantes que se obtiveram após contactos frutuosos com instituições (públicas e privada). Deste trabalho prévio foi selecionada uma área de cerca de 146.9 km<sup>2</sup>, localizada entre as longitudes 501,550.0m e 518,300.0m, por um lado, e entre as latitudes 4,307,650.0m e 4,320,600.0m, englobando parte dos municípios de Benavente e Vila Franca de Xira. Foram conduzidas, durante 3 anos, exaustivas e proficuas atividades de caracterização dos maciços desta vasta área com vista ao microzonamento sísmico da área piloto (ver detalhes em Saldanha et al., 2018; Viana da Fonseca et al. 2018, 2019a; Lai et al., 2020). Parte destes trabalhos é aqui abordada na perspetiva da avaliação da qualidade de amostragem que se desejava ao mais alto nível para os trabalhos de laboratório que forneceriam a base de parametrização para modelos de comportamento. A campanha experimental envolveu a realização de diversos ensaios *in situ*, nomeadamente ensaios de penetração dinâmica (SPT), ensaios com cone penetrómetro (CPTu) e ensaios com dilatómetro de Marchetti (DMT) com medição de ondas sísmicas através de módulos sísmicos acoplados ao CPTu e DMT (SCPTu e SDMT), bem como a recolha de amostras indeformadas para posterior análise em laboratório. Para a amostragem de elevada qualidade, foram utilizados dois amostradores com características que permitem uma recolha de amostras cuidadosa e com menores perturbações, nomeadamente o Dames & Moore e o Gel-Push. No âmbito deste trabalho, o desempenho de cada amostrador será inicialmente analisado e discutido qualitativamente, focando-se no aspeto visual das amostras recolhidas e dos tubos amostradores. Seguidamente, a análise da qualidade das amostras será feita através da comparação das velocidades das ondas sísmicas, capazes de detetar pequenas perturbações decorrentes do adensamento ou perda de estrutura durante a amostragem.

Entenda-se que as ondas sísmicas são ondas vibracionais de baixa energia com conteúdos de frequência similar aos gerados por terremotos, independentes da existência ou não de fenómenos de origem sísmica, constituindo o princípio base dos métodos geofísicos (Foti et al. 2014). Num meio elástico, existem dois tipos diferentes de ondas volumétricas: as ondas P (ondas primárias ou de compressão ou longitudinais), que se propagam através de movimentos de compressão e extensão, paralelos à direção de propagação, causando variações volumétricas sem distorções associadas, similares à propagação das ondas sonoras no ar; e as ondas S (ondas secundárias ou de corte ou cisalhamento ou distorcionais), que se propagam segundo movimentos puramente distorcionais, perpendiculares à direção de propagação, sem induzir variações volumétricas (Ferreira, 2003). As velocidades de propagação das ondas P ( $V_P$ ) e das ondas S ( $V_S$ ) dependem diretamente das características do meio onde são propagadas, sendo a velocidade de propagação das ondas P a mais elevada. Assim, a determinação de  $V_P$  e  $V_S$  permite a avaliação dos parâmetros elásticos do meio, com recurso a expressões da Teoria da Elasticidade (Santamarina et al., 2001), que se seguem:

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho} \cdot \frac{1}{(1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

em que  $E$  é o módulo de deformabilidade, ou de Young;  $\rho$  é a massa específica;  $\nu$  é o coeficiente de Poisson;  $M$  é o módulo confinado; e  $G$  é o módulo de distorção.

Por seu lado, as velocidades das ondas S são particularmente sensíveis à tensão efetiva média, ao índice de vazios, à história de tensões e à estrutura e fábrica do solo. Desde os trabalhos pioneiros de Hardin e Richart (1963), muitos autores têm apresentado formulações semelhantes, sendo habitualmente considerada a seguinte expressão para solos arenosos, que traduz a dependência das  $V_s$  com esses fatores:

$$V_s = C \cdot \sqrt{F(e)} \cdot (\sigma'_v)^{n_a} \cdot (\sigma'_h)^{n_b} \text{ ou } V_s = C \cdot \sqrt{F(e)} \cdot (p')^{n_s} \quad (3)$$

em que  $C$  é a constante adimensional, que inclui os efeitos da estrutura e fábrica do solo,  $F(e)$  é a função do índice de vazios,  $\sigma'_v$  e  $\sigma'_h$  são as tensões efetivas atuantes nas direções vertical e horizontal, respetivamente,  $p'$  é a tensão efetiva média, e os expoentes  $n_a$ ,  $n_b$  e  $n_s$  refletem a dependência das  $V_s$  com as respetivas tensões. Os valores destas constantes variam consoante o tipo de solo, podendo ser determinados através de ensaios específicos, onde se isola a influência de cada fator. O valor do expoente  $n_s$  é usualmente considerado igual a 0,25. No caso da função do índice de vazios, existe um conjunto vasto de expressões disponíveis na literatura para diversos tipos de solos, nomeadamente Iwasaki et al. (1978), Chung et al. (1984), Lo Presti et al. (1993). No presente trabalho, atendendo ao tipo de solos em análise e à gama de valores de  $e_{max}$  e  $e_{min}$ , optou-se pela expressão de Lo Presti et al. (1993):

$$F(e) = e^{-1.3} \quad (4)$$

A comparação das  $V_s$  medidas em campo, com recurso ao equipamento SDMT, com as  $V_s$  medidas em laboratório, com recurso a *bender elements*, permite classificar a qualidade de cada amostra recolhida. De modo a compatibilizar e validar a comparação das velocidades das ondas medidas no campo e em laboratório, é realizada uma normalização em função do índice de vazios e do estado de tensão.

## 2 – AMOSTRAGEM DE SOLOS: TÉCNICAS E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE

### 2.1 – A importância e os desafios de amostragem de solos

A obtenção de amostras de alta qualidade em solos arenosos é um desafio, devido à necessidade de recolher a integridade dos solos e às possíveis alterações na sua estrutura, decorrentes dos processos de amostragem, transporte e extrusão em laboratório. Por mais cuidados que sejam postos no processo de amostragem, é inevitável a alteração do estado de tensão a que estava submetido *in situ*. Assim, uma amostra é considerada indeformada quando, em relação ao maciço de onde foi retirada, experimentou apenas alterações do estado de tensão, isto é, não sofreu distorções nem variações de volume, conservando a “estrutura do solo” essencialmente inalterada. As alterações de densidade relativa ou estrutura das amostras condicionam a interpretação dos resultados obtidos em ensaios de laboratório e podem torná-los menos representativos das condições reais de campo. Deste modo, a recolha de amostras de elevada qualidade é essencial para a caracterização rigorosa dos solos e para a determinação em ensaios laboratoriais avançados das propriedades de resistência e rigidez desses materiais (Viana da Fonseca e Ferreira, 2001; Viana da Fonseca e Pineda, 2017).

Um amostrador é, na sua essência, um tubo metálico cravado no solo a uma determinada profundidade, normalmente a partir da base de um furo de sondagem, recolhendo no seu interior um volume cilíndrico de solo. Após a subida do amostrador até à superfície do terreno, o amostrador (ou parte dele) pode também ser utilizado como invólucro do solo durante as fases de transporte e armazenamento no laboratório, até à extrusão do solo e preparação das amostras para ensaios laboratoriais. Na prática profissional, estão disponíveis tipos de amostradores muito diversos, cuja escolha deverá ter em conta o tipo de solos a amostrar, as condições de acesso e os equipamentos e meios operacionais, condicionados por fatores económicos e pelos prazos.

De acordo com Hight (2000), as fases principais de uma campanha de amostragem típica envolvem: furação, inserção do amostrador e recolha da amostra, extração do amostrador do furo, selagem do tubo, transporte, extrusão de solo amostrado, armazenamento dos provetes e preparação para ensaios laboratoriais. Todas estas fases são potenciais fontes de perturbação no solo (Ladd e DeGroot, 2003; Viana da Fonseca et al., 2019b).

Para recolher amostras indeformadas, existem vários tipos de amostradores e, dada a sua grande variabilidade, a sua descrição em pormenor não se justifica no presente trabalho. De um modo geral, considera-se que, para reduzir a perturbação do solo, a cravação deve ser feita por meios estáticos e não com recurso à percussão; que a espessura da parede do amostrador deve ser a menor possível, mas capaz de resistir aos esforços de cravação; a sapata do amostrador deve ser biselada, com um ângulo de bisel reduzido, de forma a facilitar a penetração. Apresentam-se a seguir alguns procedimentos de referência, focando sobretudo a amostragem em solos não coesivos e não plásticos, como as areias, areias siltosas, siltes arenosos e siltes não plásticos, designadamente os amostradores de cravação estática de paredes finas Shelby e Osterberg, e de cravação rotativa como o Mazier e o de tubo triplo.

No caso da amostragem de solos granulares limpos, as técnicas de amostragem anteriormente descritas podem apresentar grandes dificuldades, por incapacidade de retenção e queda das amostras durante a subida do amostrador para o exterior do furo. Assim, têm surgido outras técnicas, sobretudo desenvolvidas por investigadores japoneses, como a congelação dos solos (Yoshimi et al, 1994) e as recentes adaptações de amostradores convencionais para redução do atrito no interior do amostrador.

A técnica da amostragem por congelação, apesar de ser de execução complexa, com custos muito elevados e por isso raramente utilizada, é uma solução em areias limpas e abaixo do nível freático, consistindo essencialmente no arrefecimento prévio e congelação do solo (saturado) em torno da profundidade a amostrar, com recurso a nitrogénio líquido, recolhendo-se as amostras com um amostrador com avanço à rotação, usando água fria com anticongelante como fluido de circulação, de modo análogo à amostragem de maciços rochosos.

No entanto, uma causa mal contornada nos amostradores convencionais é a de perturbação nas amostras de solo por atrito excessivo gerado durante a penetração do amostrador no terreno (Chen et al., 2014). Para resolver esta questão do atrito no interior do tubo amostrador, os amostradores Dames & Moore (D&M) e Gel-Push (GP) foram desenvolvidos, respetivamente nos Estados Unidos da América e no Japão. Estes amostradores incorporam melhorias significativas na sua conceção na vertente dos materiais constituintes e configuração das diferentes partes, o que permite reduzir o atrito entre a amostra e as paredes do tubo interior (*liner*) no qual é coletado o solo. Estas melhorias permitem recuperar amostras praticamente intactas de areias de densidade média, areias siltosas, siltes, siltes arenosos, siltes argilosos e argilas (Markham et al., 2016; Bray et al., 2017; Viana da Fonseca et al., 2019b, 2019c), como será descrito adiante.

## 2.2 – Amostradores convencionais

O amostrador Shelby é um amostrador de paredes finas, muito utilizado em Portugal. Os tubos de recolha são em aço, sem costuras e sem folga interior, com 500mm de comprimento, 77,5mm de diâmetro interno e cerca de 3mm de espessura da parede. O ângulo de bisel é de 30°. Sendo um

amostrador de cravação estática, apresenta-se como mais adequado a solos sem elementos grosseiros. No caso de serem usados maiores diâmetros, este amostrador de paredes lisas retificadas apresenta dificuldades na recolha, por risco de queda da amostra. Dado o seu grande comprimento e constituição metálica, a amostra tem que ser extrudida do amostrador por compressão em pistão, o que acarreta evidentes danos em termos da preservação da estrutura, afetando inevitavelmente a qualidade das amostras.

Outro amostrador de cravação estática muito utilizado em Portugal é o Osterberg. O equipamento desce até ao fundo do furo, obturado pelo êmbolo fixo, pelo que pode atravessar alguma espessura de lamelas e solos deteriorados eventualmente existentes no fundo do furo, antes de ser acionado. Após posicionado, o tubo amostrador, de parede fina, é cravado lenta e continuamente por ação de ar comprimido, introduzido pelo interior do trem de varas. Quando o invólucro da amostra está totalmente preenchido, a cravação é automaticamente suspensa, porque o ar comprimido passa a escapar-se pelo tubo central, deixando então de atuar sobre o êmbolo móvel. Este sistema evita a chamada “sobrecravação”, isto é, a continuação da cravação do tubo após este estar completamente preenchido com a amostra, o que naturalmente perturbaria gravemente o solo.

Por outro lado, o amostrador Mazier foi concebido a partir do conceito de preservação estrutural do amostrador de Laval (La Rochelle et al., 1981) mas com maior flexibilidade de potência. É constituído por um tubo triplo rotativo, contendo um *liner* (tubo interior) em polietileno – de 61 a 108,5mm de diâmetro interno e um comprimento de 1000 mm. Uma medida útil da geometria dos amostradores é dada pelo coeficiente de parede ou coeficiente da razão de folga interna (*RI*), como se descreve abaixo:

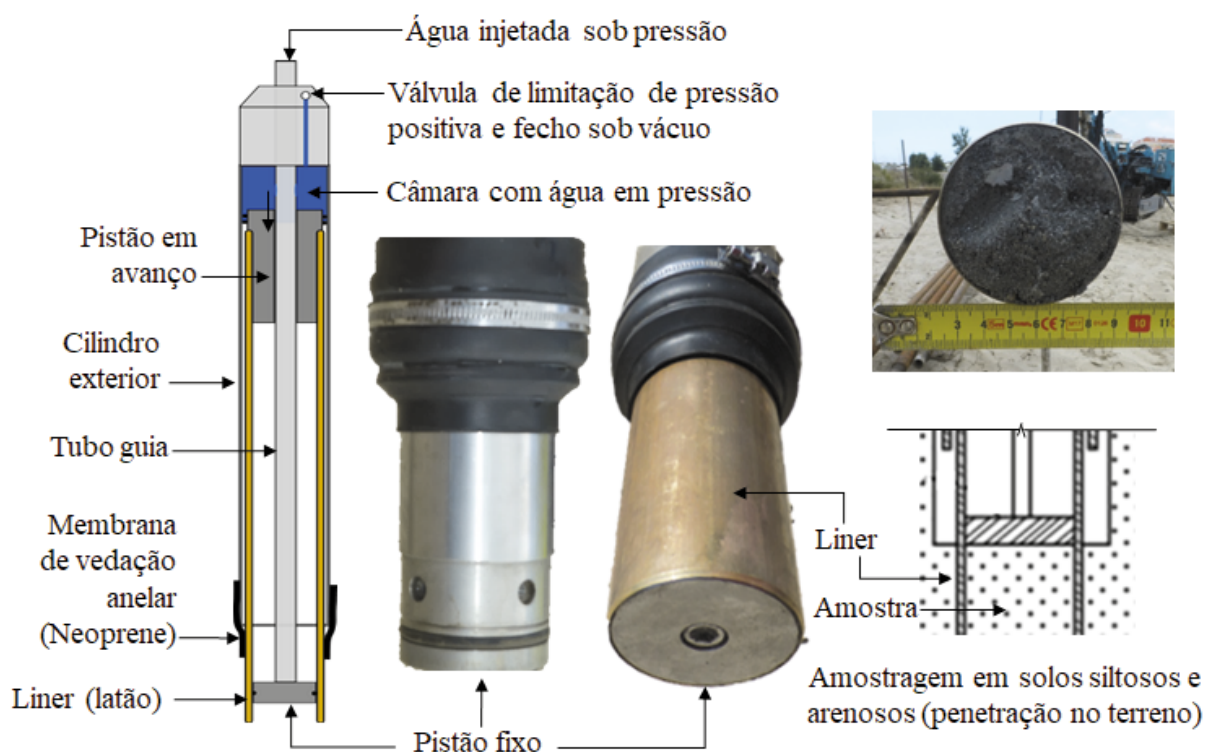
$$RI = \frac{D_s - D_i}{D_i} \cdot 100\% \quad (5)$$

onde  $D_s$  e  $D_i$  são os diâmetros exterior e interior do *liner*, respetivamente. Devido à sua configuração e geometria, o amostrador Mazier apresenta valores de *RI* a partir de 3,5% de coeficiente de entrada (Ferreira, 2003). Por outro lado, este amostrador tem ainda algumas particularidades, nomeadamente: o tubo cortante (solidário com o *liner*) segue em avanço no processo de cravação de um intervalo inversamente proporcional à rigidez ou resistência do solo; o diâmetro interno do cortante tem um valor ligeiramente inferior ao do *liner* (folga interior), que é desaconselhável em alguns solos; o amostrador dispõe ainda de uma “cesta” de retenção (típica de amostradores para solos arenosos) de dentes abertos. Outros amostradores de carotagem rotativa de tubo triplo (como por exemplo, o Tecso T6-S) são geralmente constituídos por um tubo duplo de paredes grossas seccionado e rotativo com *liner* interior estacionário em polietileno, PVC ou inox bipartido, de diâmetro interno entre 88 e 118 mm e uma folga interior de 2 mm. Apresentam sapatas de corte com ângulos de bisel entre 30 e 40°, no entanto, nalguns modelos mais recentes, os ângulos de bisel foram reduzidos para 5 a 6°, o que é um salto muito significativo na qualidade das amostras recolhidas. O comprimento destes amostradores ronda os 1500 mm. Esta técnica tem demonstrado alguns problemas associados à descarga de água, que se revela, muitas vezes, danosa para a preservação da estrutura de solos, nomeadamente com alguma percentagem de finos (Viana da Fonseca e Ferreira, 2001).

### 2.3 – Amostrador Dames & Moore

O amostrador Dames & Moore (D&M), cujo princípio de operação é o mesmo do amostrador tipo Osterberg (Osterberg, 1973), é um equipamento modificado baseado na ativação hidráulica de um pistão fixo. O D&M é constituído por um tubo amostrador interior ou *liner* de latão de paredes finas e com uma superfície interior nano texturada, ou seja, muito polida, com 50 cm de comprimento. A combinação do tipo de material com o comprimento reduzido minimiza significativamente o atrito entre as paredes do tubo e o solo, reduzindo as perturbações durante a

amostragem e extrusão da amostra (Viana da Fonseca e Pineda, 2017). Segundo Viana da Fonseca et al. (2019b, 2019c) a principal vantagem do D&M é a existência de uma membrana de vedação anelar de neoprene na transição do *liner* amostrador (que acomoda no seu interior o pistão estacionário antes da cravação daquele no terreno) com o tubo exterior de revestimento. A membrana de vedação anelar, em conjunto com a válvula de controlo de pressão garante eficientemente a manutenção de vácuo durante a recuperação do amostrador no furo depois da amostragem, impedindo a queda do solo recolhido. Este vácuo é gerado passivamente pela diferença de pressões existente entre o sistema e o solo amostrado com o exterior. No entanto, não existem medições que permitam quantificar o valor do vácuo gerado durante o processo de recuperação do amostrador. Note-se que num amostrador Osterberg convencional esta parte não é vedante. Além disso, o vedante evita a entrada de material perturbado para o interior do *liner*. Na Figura 1 é apresentado um esquema dos componentes do amostrador D&M.



**Fig. 1** – Diagrama dos componentes do amostrador D&M

Além desta aplicação em Portugal, o amostrador D&M tem sido usado para recolher amostras de areias (médias e densas) e siltes na Turquia (Bray e Sancio, 2006) e na Nova Zelândia (Markham et al., 2016), as quais foram usadas para estudos de liquefação com amostras representativas em laboratório. As amostras recolhidas têm cerca de 45 a 50 cm de comprimento e 63 mm de diâmetro. O amostrador D&M é inserido num furo de sondagem, previamente perfurado, a uma profundidade específica. De seguida, o equipamento é conectado a uma bomba de água para aplicação de uma pressão hidráulica de 1400 kPa (14 bar) e o amostrador é cravado no terreno a uma taxa de penetração constante de 1 m/min. Na conclusão do avanço do revestimento (50 cm), o tubo permanece estacionário durante pelo menos um minuto. O amostrador é extraído do furo e o *liner* é removido do amostrador. As extremidades do *liner* devem ser fechadas e seladas para evitar alterações no estado do solo (por exemplo, alterações no teor em água e densidade relativa) e perdas de material. No final, a amostra de solo é transportada e armazenada, para caracterização laboratorial.

## 2.4 – Amostrador Gel-Push

O Gel-Push (GP) é uma técnica avançada de amostragem, que utiliza um gel polimérico de viscosidade variável e controlável como fluido de perfuração. O nome da técnica deve-se ao facto desse fluido ter características especiais com cariz evolutivo que o torna particularmente ajustado a otimizar cada fase de amostragem. A utilização do gel, cuja preparação segue procedimentos especiais e patenteados, permite reduzir significativamente o atrito entre a amostra e o *liner* (Mori e Sakai, 2016), aquando da cravação do *liner* com uma pressão e caudal muito bem condicionados para não haver sobrepressões ou oscilações.

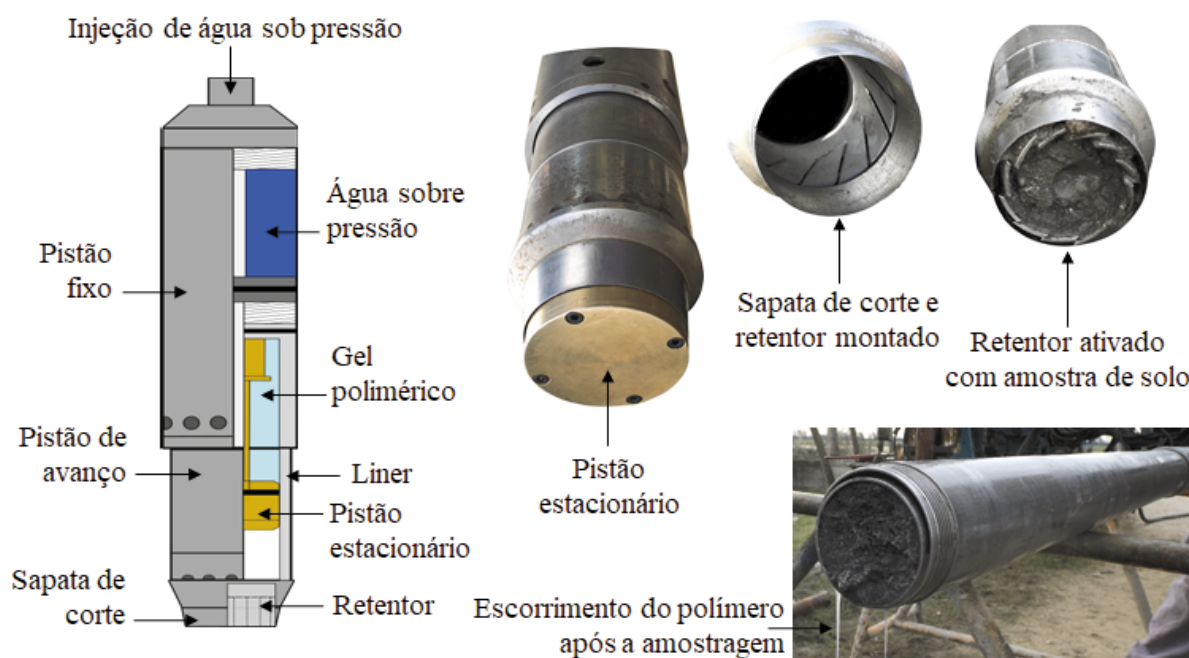
O gel que fica na parede do solo também favorece a extrusão em laboratório (Taylor et al., 2012). Além disso, as propriedades reológicas do gel, que determinam e controlam a sua viscosidade, permitem a preservação da estrutura do solo, ao longo de todo o amostrador, pelo que desempenham um papel fundamental na sustentação da alta qualidade das amostras.

Esta técnica avançada de amostragem foi desenvolvida pela empresa geotécnica japonesa Kiso-Jiban Consultants e inclui quatro variações diferentes do GP: *GP-Rotary*, *GP-Drilling*, *GP-Triple* e *GP-Static*. Neste trabalho, foi utilizado o equipamento *GP-Static* (GP-S), considerado o mais adequado para amostragem de solos granulares soltos. O GP-S é um amostrador que segue os conceitos de amostragem com pistão fixo, semelhante ao D&M. Contrariamente ao pistão fixo hidráulico convencional, o GP-S é composto por um sistema que inclui três pistões: o pistão estacionário, o pistão de avanço de amostragem e o pistão de ativação do amostrador. O pistão estacionário é fixo e os outros dois são móveis (Viana da Fonseca et al., 2019b). O tubo externo encosta ao furo e mantém a haste e o pistão de penetração fixos e alinhados durante a penetração. Por sua vez, o pistão de avanço contém o gel e garante o movimento descendente do sistema para ativar o amostrador enquanto é inserido no terreno. O pistão amostrador é cravado no terreno e recolhe a amostra dentro de um tubo interior metálico em aço inoxidável de superfície muito lisa. No final da cravação, o retentor de amostra (tipo borboleta), também designado por “*core catcher*”, é rodado suavemente com um controlo em tempo da pressão estritamente necessário para a rotação e fecho das palhetas que se ilustra na Figura 2. Este retentor (“*catcher*”) é feito de uma liga especial de duralumínio e foi concebido para fechar parcialmente. O fecho do retentor previne a queda da amostra durante a recuperação do equipamento. O solo que fica no retentor é descartado imediatamente. A Figura 2 mostra um esquema dos componentes do amostrador GP-S.

O processo de recolha de uma amostra com este amostrador envolve várias fases. Antes da amostragem, o gel é preparado na proporção volumétrica de 1% de polímero viscoso em água limpa e imediatamente inserido no amostrador. O amostrador é montado e inserido no furo de sondagem. O sistema é conectado a uma bomba de água, que injeta 5 l/min de água limpa no amostrador, garantindo uma pressão constante de 50 MPa. Devido à pressão no sistema, o pistão de avanço desloca-se, fazendo avançar o colar biselado de corte, que penetra no solo a uma taxa constante de 1 m/min. Simultaneamente, o pistão hidráulico fecha uma válvula de desvio e o pistão fixo pressiona o gel no coletor, lubrificando a face interna do tubo amostrador através da sua extremidade inferior na posição exata em que o solo é inserido. Quando o pistão de avanço atinge o comprimento máximo do revestimento (1 m), o gel remanescente flui através do revestimento, criando uma camada fina de gel na interface solo-revestimento. O pistão permanece nessa posição durante um período de 3 a 5 minutos a uma pressão de 50 MPa (500 bar), com o objetivo de garantir que o retentor se feche completamente. Depois desta fase, o amostrador é extraído do furo e o revestimento é removido do equipamento e fechado hermeticamente. O fecho do retentor permite assegurar a recolha da amostra de solo e assim prevenir a sua queda durante a extração do amostrador para a superfície.

O amostrador Gel-Push foi utilizado com sucesso na recolha de amostras de solos suscetíveis à liquefação em vários países, nomeadamente em Taiwan e no Japão (Lee et al., 2012), Bangladesh (Ishihara et al., 2016), Polónia (Jamiolkowski e Masella, 2015), Nova Zelândia (Taylor et al., 2012; Umehara et al., 2015) e recentemente em Portugal (Viana da Fonseca et al., 2019b; Molina-Gómez et al., 2020).





**Fig. 2** – Diagrama dos componentes do GP-S

## 2.5 – Avaliação da qualidade de amostragem

A avaliação de qualidade de amostragem pode ser feita em laboratório com recurso a diversas técnicas, nomeadamente a observação e inspeção visual da fábrica, a medição das variações volumétricas durante a reconsolidação (sobretudo no caso de solos finos), a medição e comparação das tensões médias efetivas iniciais, ou da resistência à compressão ou não drenada *in situ* e em laboratório sobre amostras retiradas com diferentes amostradores, ou ainda pela comparação das velocidades de ondas sísmicas ou do módulo de distorção máximo,  $G_0$ , *in situ* e em laboratório (Viana da Fonseca e Ferreira, 2002a). Uma vez que as velocidades das ondas S são estritamente relacionadas com o estado de tensão, as condições de estado e a estrutura e fábrica do solo, o controlo e comparação destas velocidades em condições de jazida e em laboratório, em amostras colhidas por diferentes processos de amostragem, é atualmente reconhecido como uma das técnicas mais precisas para avaliar a sua qualidade (Landon et al. 2007; Ferreira et al., 2011).

Neste trabalho, a avaliação da qualidade das amostras recolhidas foi feita com base na comparação entre as velocidades das ondas S medidas em campo e no laboratório, utilizando a proposta de Ferreira et al. (2011). Uma vez que a velocidade das ondas S é um parâmetro que caracteriza a rigidez das amostras no domínio das pequenas deformações, permite detetar diferenças de estado e alterações na estrutura e fábrica das amostras (Viana da Fonseca et al., 2019b).

Para que as velocidades das ondas S medidas em laboratório e no campo sejam efetivamente comparáveis, é necessário implementar um processo de normalização do estado do solo, através de uma função de índice de vazios (como a da Eq. 4). Além disso, no caso de diferenças do estado de tensão em laboratório em relação ao estado *in situ*, também é necessário proceder a uma normalização do estado de tensão. Neste caso, as velocidades das ondas S foram medidas com recurso a *bender elements* “de bancada” no laboratório, apenas confinadas pelo tubo PVC, daí ter sido também implementada esta normalização.

Para estimativa dos valores de referência do índice de vazios natural *in situ*, uma vez que não é possível medi-los diretamente, foram consideradas algumas simplificações. A densidade das partículas sólidas,  $G_s$ , considerada foi de 2.65 (valor médio obtido em laboratório nas amostras ensaiadas) e o solo foi considerado totalmente saturado, uma vez que as amostras recolhidas se



encontravam abaixo do nível freático. O peso volúmico *in situ* foi calculado através da proposta de Robertson e Cabal (2010) que estima o peso volúmico com base nos parâmetros do ensaio CPTu.

Por outro lado, o índice de vazios das amostras foi calculado em laboratório através de medições diretas do peso, volume e teor em água de cada amostra. Uma vez que as amostras GP e D&M se encontravam no interior de tubos PVC, adotou-se o diâmetro e altura internos médios dos tubos para as dimensões de todas as amostras, isto é, 72 mm de diâmetro e 148 mm de altura para as amostras GP e 61 mm de diâmetro e 120 mm de altura para as amostras D&M.

A normalização da velocidade das ondas S em função de índice de vazios foi feita segundo a proposta de Lo Presti et al. (1993), apresentada na equação (4). A velocidade das ondas S foi normalizada utilizando a equação seguinte, deduzida a partir da equação (3):

$$V_S^* = \frac{V_S}{\sqrt{F(e)}} \quad (6)$$

Por outro lado, uma vez que as amostras ensaiadas no laboratório se encontravam à pressão atmosférica, confinadas apenas pelo tubo de PVC, foi necessário normalizar os valores da velocidade obtida em laboratório de acordo com o estado de tensão. A medição das ondas foi realizada imediatamente após a extrusão das amostras do tubo metálico do amostrador para tubos PVC de menor altura (altura correspondente à da amostra a ser ensaiada posteriormente na câmara triaxial). Para efeitos de comparação com os valores de campo, e considerando o peso próprio da amostra e o confinamento conferido pelo tubo de PVC, uma tensão média efetiva de  $p'=2$  kPa foi utilizada na normalização.

A normalização da velocidade das ondas S medidas em laboratório para o estado de tensão *in situ* foi realizada pela equação (3), sendo  $V_S^*$  a velocidade das ondas S normalizada com a função de índice de vazios,  $p'_0$  a tensão média efetiva correspondente à profundidade em que a amostra foi recolhida e  $p'$  a tensão média efetiva correspondente ao ensaio de bancada, igual a 2 kPa:

$$V_S^{**} = V_S^* \left( \frac{p'_0}{p'} \right)^{0.25} \quad (7)$$

### 3 – CAMPO EXPERIMENTAL

Com base numa avaliação exaustiva de informação geológica e geotécnica existente (Saldanha et al., 2018; Ferreira et al., 2020), o campo experimental foi selecionado e localiza-se na região do baixo Tejo, no norte de Benavente. A região é constituída por areias aluvionares dos rios Tejo e Sorraia, onde se encontram depósitos recentes de areias quaternárias (Gouveia et al., 2018). Para além disso, a sismicidade da zona é elevada, devido à proximidade com a fronteira das placas africana e euro-asiática, estando sujeita à ocorrência de terremotos de magnitude elevada ( $M_w > 8$ ) e de magnitude média ( $M_w > 6$ ) (Azevedo et al., 2010).

A geologia e geomorfologia da zona, aliadas ao elevado risco sísmico, potenciam a ocorrência de terremotos, muitas vezes associados a fenómenos de liquefação (Saldanha et al., 2018). Relatórios sobre o evento sísmico que ocorreu em 23 de abril de 1909 ( $M_w = 6.0$  e com epicentro perto de Benavente) indicaram que houve danos e destruição significativos em várias cidades e vilas localizadas nesta região (Teves-Costa e Batlló, 2011).

Com o intuito de estudar ao pormenor a suscetibilidade à liquefação do local, uma extensa campanha experimental foi desenvolvida no âmbito dos projetos LIQ2PROEARTH e LIQUEFACT, recorrendo a ensaios de penetração para caracterização geotécnica e geomecânica dos solos existentes. Os ensaios de campo incluíram ensaios de penetração dinâmica (SPT), ensaios com cone penetrómetro (CPTu) e ensaios com dilatómetro de Marchetti (DMT) com medição de ondas

sísmicas (SCPTu e SDMT). Complementarmente, realizou-se a recolha de amostras indeformadas com recurso a dois tipos de amostradores de alta qualidade, o Gel-Push e o Dames & Moore, para serem posteriormente ensaiadas em laboratório. As amostras foram recolhidas em furos próximos do local onde se realizaram os ensaios, de modo a minimizar os desvios das camadas do perfil longitudinal de solo.

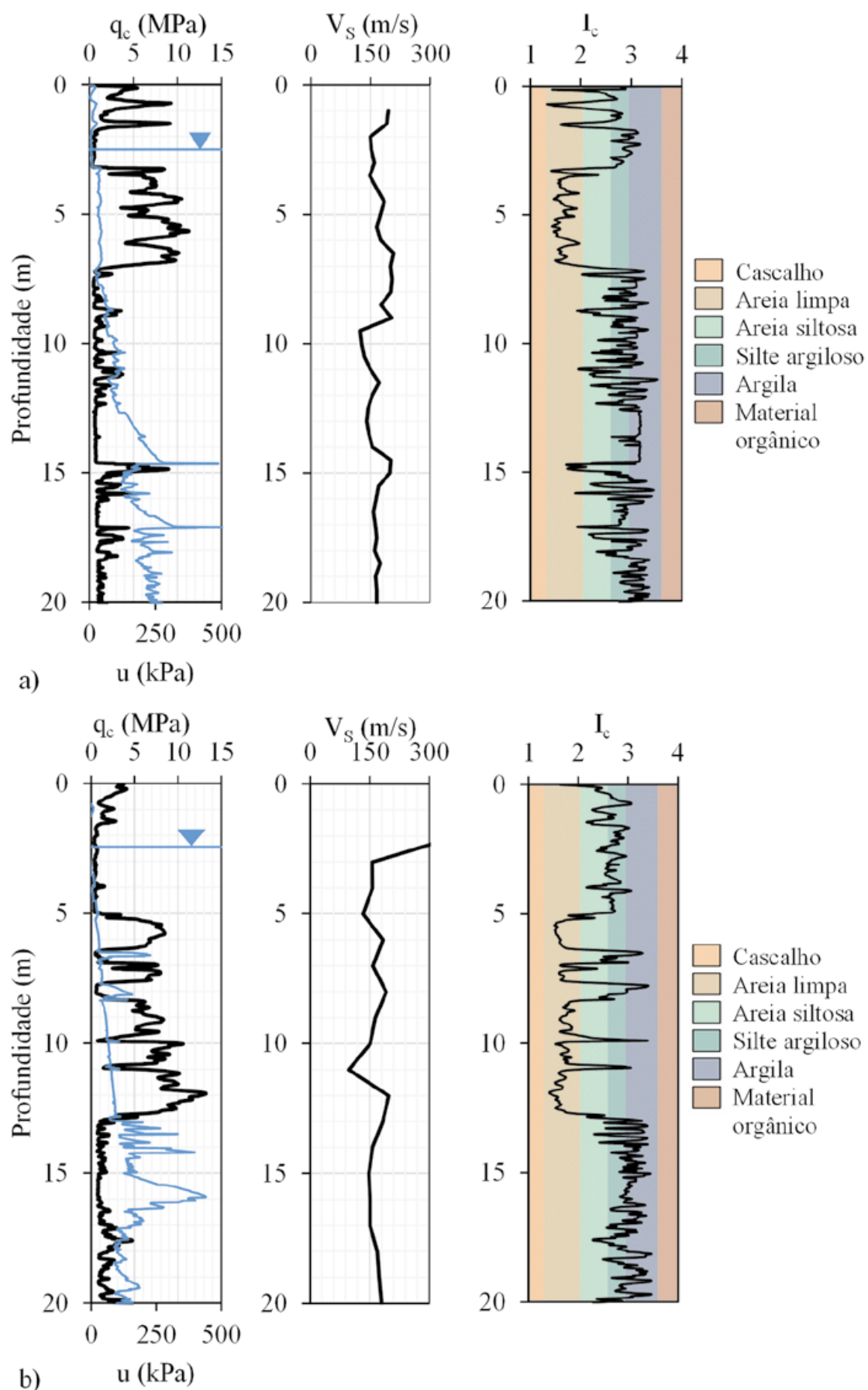
O presente estudo foca a análise dos ensaios realizados em dois locais distintos, distanciados de cerca de 1 km (Figura 3). Os dois locais estão localizados nas coordenadas 39°1'15,37''N-8°49'1,47''W e 39°1'0,77N-8°50'25,89''W, e foram identificados como NB1 e NB2, respetivamente. A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios CPTu realizados em cada um dos locais, incluindo a resistência de ponta ( $q_c$ ) e poro-pressões ( $u$ ) em profundidade e os perfis de velocidade das ondas S ( $V_s$ ) medidas pelo SDMT no local NB1 e pelo SCPTu no local NB2. Adicionalmente, os perfis do tipo de comportamento do solo ( $I_c$ ) para cada local também são apresentados. Com base nos resultados dos ensaios CPTu, foi possível selecionar as camadas mais críticas em termos de suscetibilidade à liquefação e definir as profundidades para a recolha de amostras indeformadas.



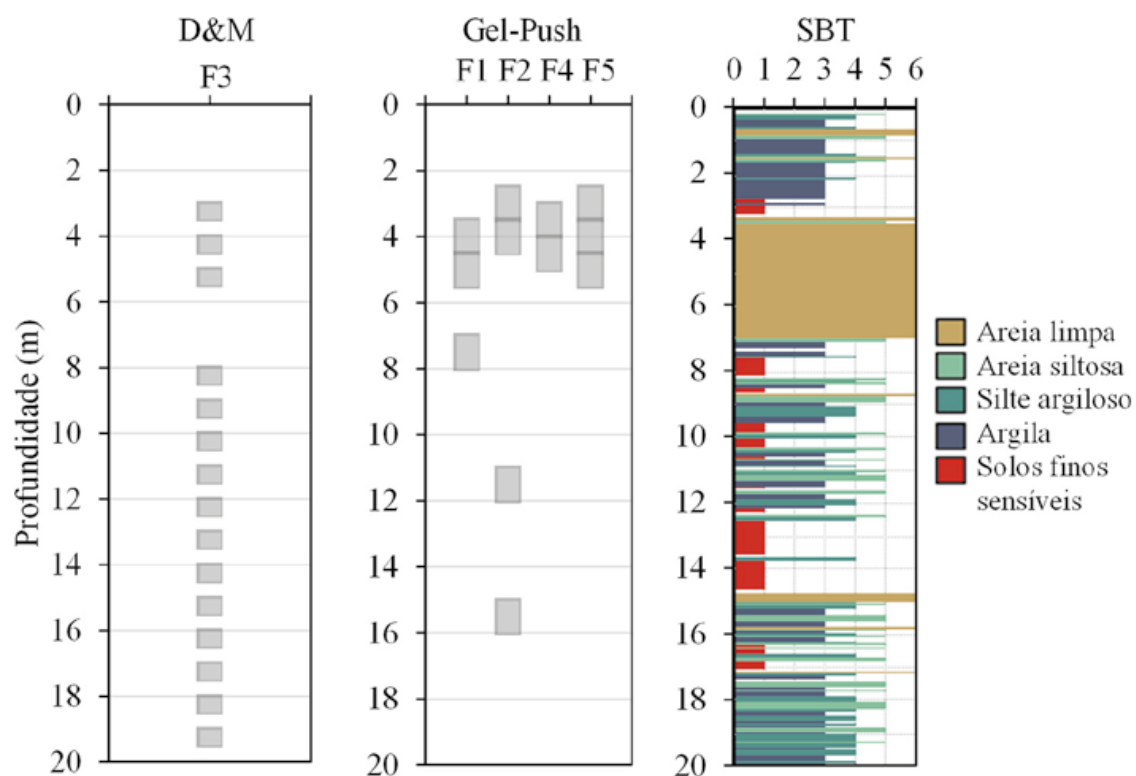
**Fig. 3** – Localização dos locais de amostragem do campo experimental (adaptado da carta geológica de Portugal, LNEG).

#### 4 – DESEMPENHO DAS TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM

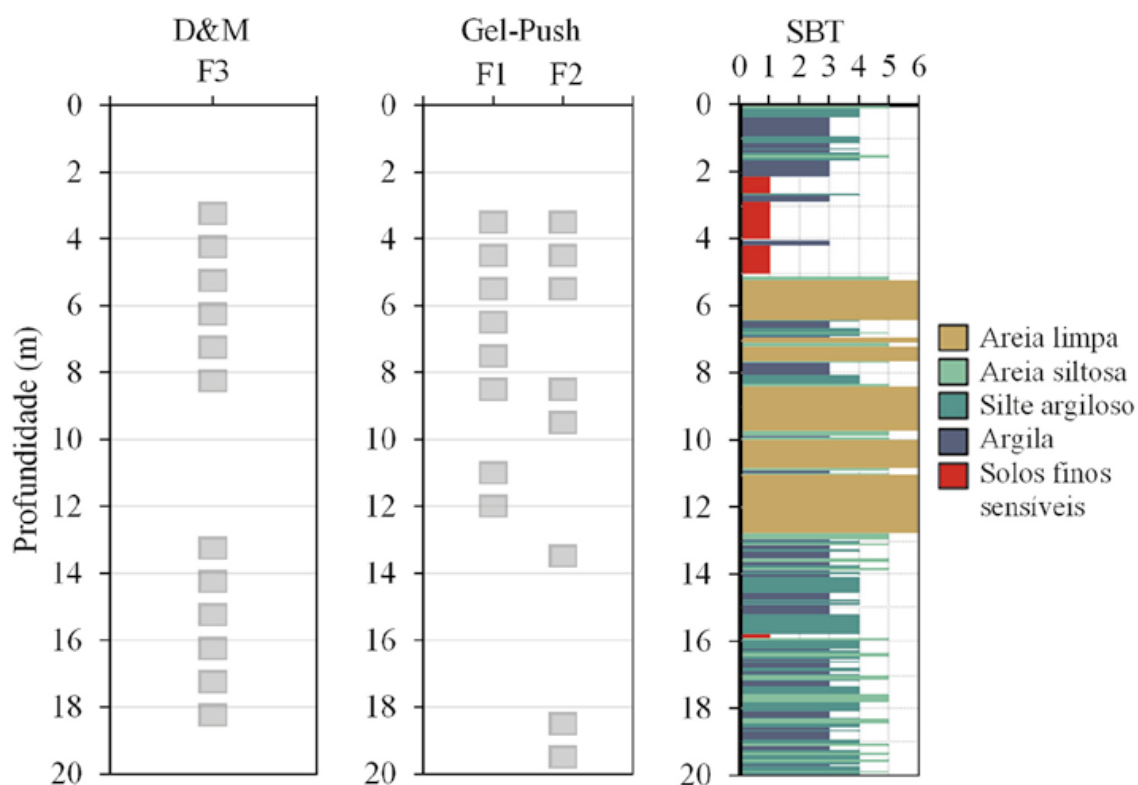
Durante a campanha experimental nestes locais, foram recolhidas 27 amostras com recurso ao D&M e 28 amostras utilizando o GP-S. No local NB1, foram recolhidas amostras em cinco furos, sendo que num furo foi utilizado o amostrador Dames & Moore (D&M) e em quatro furos foi utilizado o amostrador Gel-Push (GP-S). No local NB2, foram selecionados três furos para amostragem, um onde foi utilizado o D&M e dois onde foi utilizado o GP-S. Os furos localizam-se a cerca de 5 m do local onde foram realizados os ensaios SCPTu e SDMT. Com base na interpretação do perfil do tipo de comportamento do solo ( $I_c$ ), proposto por Robertson (2009), foram selecionadas as profundidades para amostragem, que se encontram esquematizadas na Figura 5, para cada local e técnica de amostragem utilizada. A Figura 5 apresenta também o perfil simplificado de tipo de solo ( $I_c$  – *soil behaviour type index*) para cada local, definido através da classificação de Robertson (1990) com base nos resultados obtidos em profundidade pelo ensaio CPTu. A taxa de recuperação de D&M variou entre 80% e 94%, enquanto para o GP-S essa proporção variou entre 43% e 88%.



**Fig. 4** – Resultados dos ensaios realizados em: a) NB1 (CPTu e SDMT); b) NB2 (SCPTu)



a)

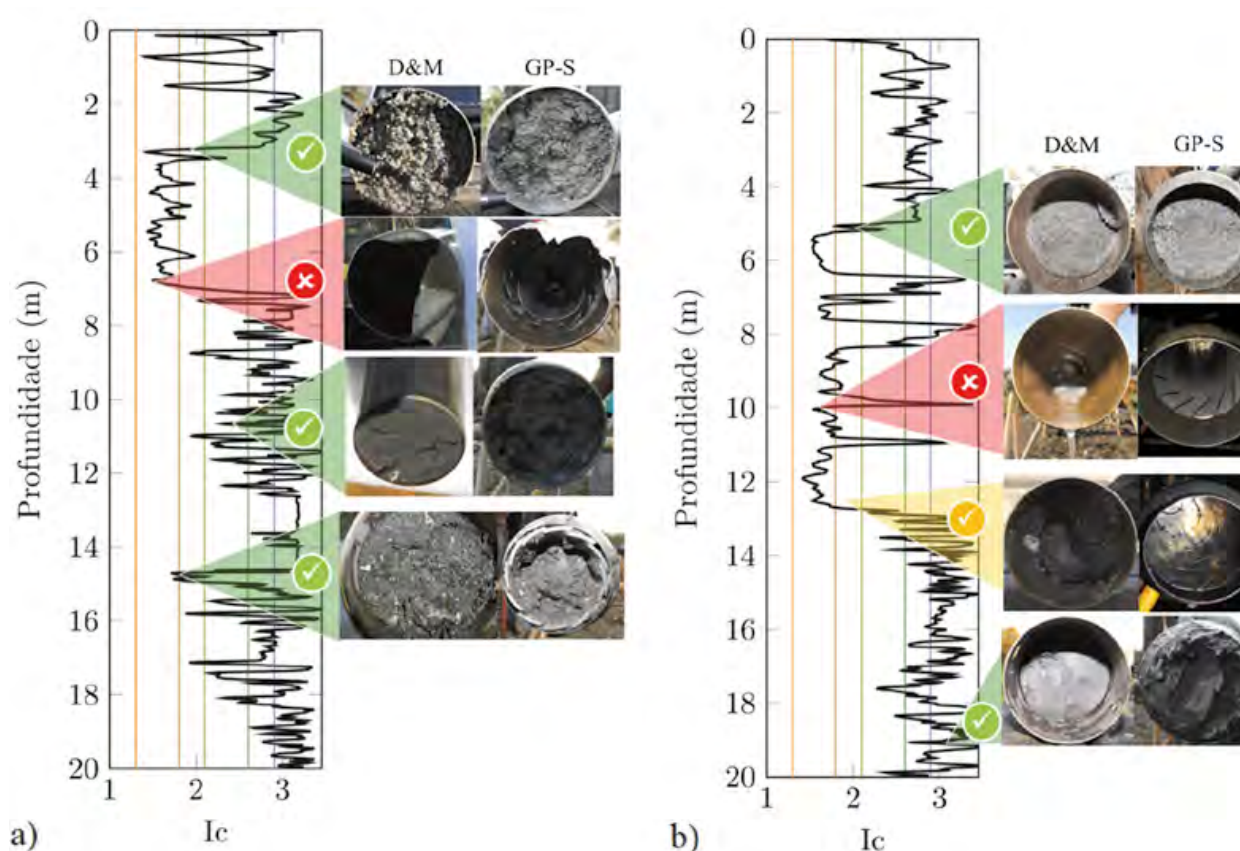


b)

**Fig. 5** – Amostras recolhidas usando técnicas avançadas de amostragem e perfil do tipo de solo: a) NB1; b) NB2

As diferenças na eficiência de recuperação podem estar relacionadas com o comprimento do tubo amostrador, que é menor no D&M. Além disso, o vácuo conseguido passivamente pela membrana de vedação anelar de neoprene durante a inserção do amostrador D&M, protege a amostra e evita a perda de material durante a recuperação do equipamento. No caso do GP-S, observou-se que o desempenho do retentor é reduzido em função do aumento do conteúdo de finos plásticos nas amostras recolhidas, devido a uma acrescida probabilidade de a amostra cair durante a extração do GP-S do furo de amostragem.

O desempenho das duas técnicas de amostragem é apresentado na Figura 6, para os dois locais selecionados. Para determinadas profundidades é mostrada a fotografia do amostrador e o solo recolhido, estando representadas: a verde (com o símbolo ✓) as profundidades em que ambos os amostradores foram bem sucedidos na recolha de amostras; a cor laranja, as profundidades em que apenas um amostrador recolheu amostra; e a vermelho (com o símbolo ✕) as profundidades em que ambos os amostradores falharam na recolha de amostras. O desempenho dos amostradores é avaliado de acordo com a capacidade de recolha de diferentes tipos de solo.



**Fig. 6** – Desempenho de ambas as técnicas avançadas de amostragem: a) NB1; b) NB2

Da análise das Figuras 5 e 6, é possível concluir que os amostradores Dames & Moore e Gel-Push foram competentes na amostragem de camadas de solo com areias médias e densas, areias finas, areias siltosas, lodos e argilas. No entanto, a recolha de solos granulares com cascalho não foi possível com nenhum amostrador, o que pode ser justificado pelos elevados valores de resistência de ponta ( $q_c$ ), superiores a 8 MPa, que se verificaram nessas profundidades (Figura 4). Além disso, os dois amostradores sofreram algum dano na sapata de corte ao penetrar as camadas com cascalho, tal como é visível na Figura 6a para a profundidade de 7 m. No caso da amostragem de solos mais resistentes constituídos por partículas de maiores dimensões, o ideal será a utilização de equipamentos que funcionem à rotação, como por exemplo o GP-rotary, uma vez que estes permitem perfurar materiais grosseiros (Mori e Sakai, 2016).



Por outro lado, verificou-se que os amostradores não foram competentes na recuperação de amostras de areias limpas, uma vez que não conseguiram reter o material dentro do tubo amostrador, devido às condições de densidade relativa deste tipo de materiais em condições saturadas (Figura 6b, a 10 m e 13 m de profundidade). No entanto, no local NB2 a 13 m de profundidade o amostrador D&M conseguiu recolher amostra de areia solta limpa. O melhor desempenho do amostrador D&M na recolha de amostras nessa profundidade deveu-se possivelmente à existência da membrana de vedação anelar de neoprene que gera, em conjunto com a válvula de controlo de pressão, uma sucção parcial durante a amostragem e permite recuperar amostras de areia solta limpa.

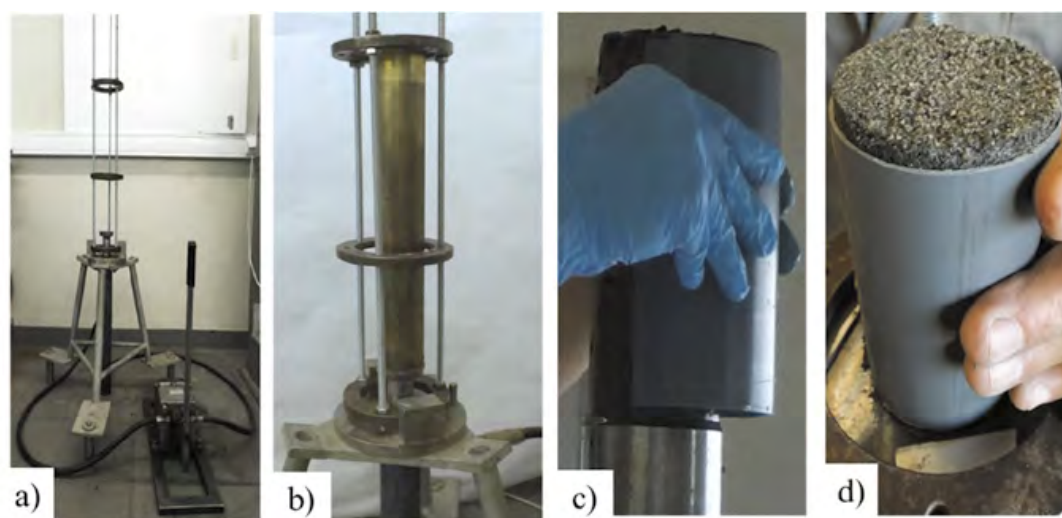
## 5 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE AMOSTRAGEM

### 5.1 – Inspeção visual das amostras

A inspeção visual é um método empírico, e por isso subjetivo, de avaliação da qualidade de amostras, uma vez que se baseia na observação da superfície periférica das amostras quando estas são retidas do interior do tubo amostrador. Este método consiste na observação da superfície das amostras, na caracterização do tipo de solo que as constitui e na identificação de danos visíveis na superfície, tais como buracos, fissuras ou distorções de forma. Assim, apesar de não ser o método preferencial para determinação da qualidade das amostras, permite identificar e selecionar as amostras em melhores condições para ensaios laboratoriais mais avançados.

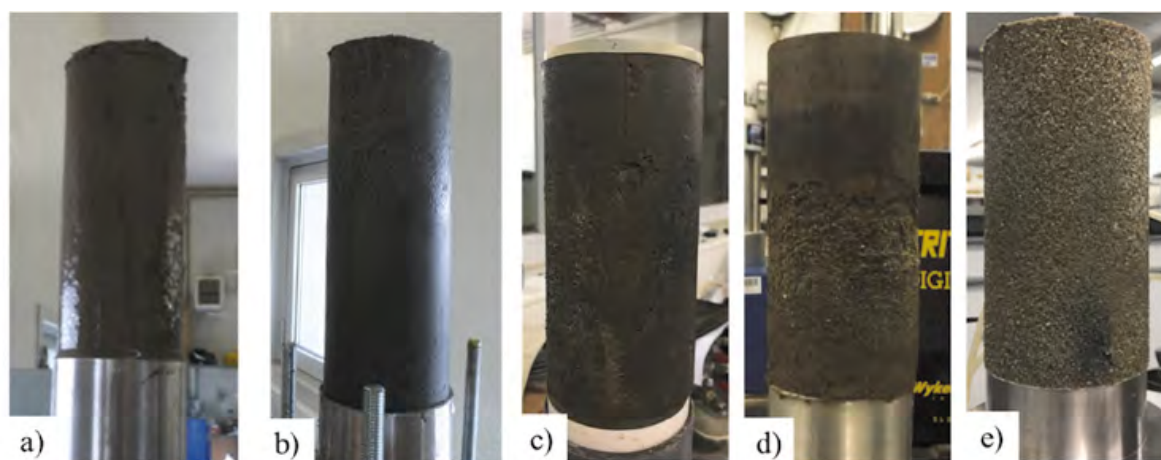
As amostras recolhidas com GP e D&M foram extraídas dos tubos amostradores assim que chegaram ao laboratório, com recurso a uma prensa hidráulica. A utilização da prensa hidráulica permite extrair as amostras na direção vertical, garantindo a mesma orientação que a recolha de amostras em campo. A extração das amostras verticalmente é mais eficiente pois reduz a geração de planos de rutura induzidos por tensões de tração, menores nos solos não coesivos. Após a extração, as amostras foram divididas em amostras individuais, preservadas em tubos PVC, com as dimensões definidas para os ensaios triaxiais e catalogadas. A Figura 7 apresenta o processo de extração das amostras GP e D&M no laboratório.

A inspeção visual foi executada enquanto as amostras eram extraídas do tubo amostrador. Na Figura 8 encontram-se algumas fotografias de amostras GP e D&M aquando da extrusão em laboratório. Na maioria das amostras não foram identificados danos radiais, fissuras ou distorção de



**Fig. 7** – Extração das amostras GP e D&M no laboratório: a) pistão extrator vertical; b) posicionamento do *liner*; c) armazenamento de uma amostra silto-arenosa dentro do tubo de PVC; d) amostra arenosa coletada com o D&M dentro do tubo de PVC.

forma, sendo a superfície da amostra lisa. Tal deve-se ao uso do gel no GP, mais evidente nas amostras de solos com baixa permeabilidade (amostras com maior conteúdo de finos plásticos), e à superfície lisa do amostrador D&M, que contribuíram para a redução do atrito entre o solo e a parede do *liner*, protegendo a superfície da amostra.



**Fig. 8** – Amostras recolhidas com os amostradores GP e D&M: a) amostra GP coberta de gel polimérico; b) amostra GP siltosa; c) amostra GP silto arenosa coletada; d) amostra D&M com camadas de areia e argila; e) amostra D&M de areia limpa

## 5.2 – Metodologia em laboratório

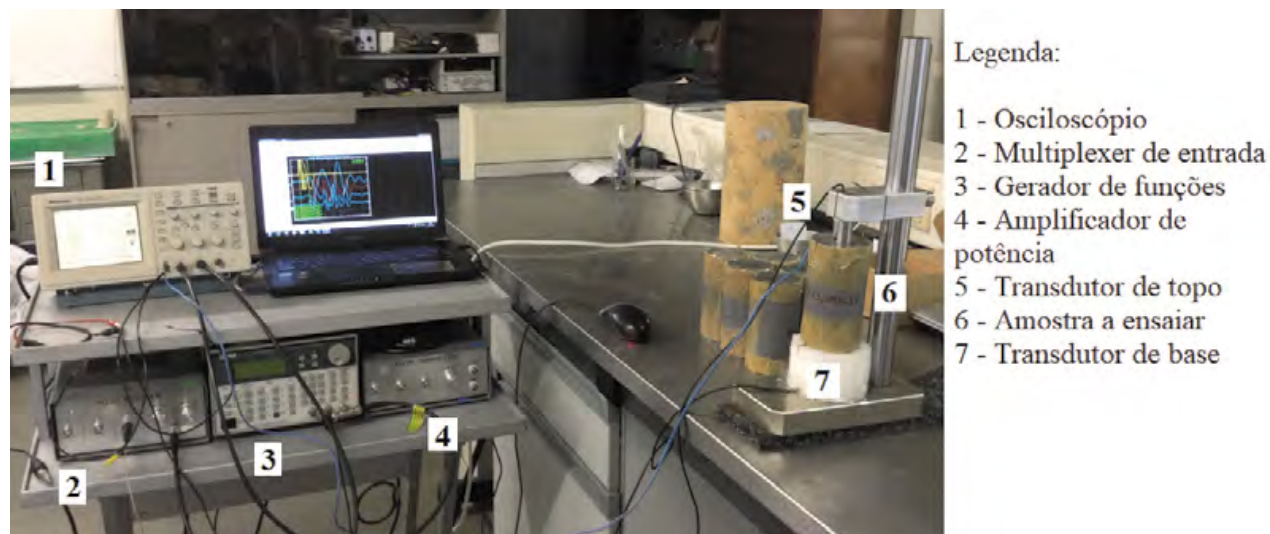
Como foi referido anteriormente, a técnica adotada neste trabalho para avaliação da qualidade de amostras de solo recolhidas é baseada na comparação da velocidade das ondas S medidas no campo e em laboratório (Ferreira et al., 2011). Uma vez que as ondas S são propagadas pelo esqueleto do solo, podem ser muito úteis na identificação de alterações na fábrica e estrutura das amostras, causadas pelo processo de amostragem (Viana da Fonseca e Pineda, 2017). Em laboratório, a medição de ondas S em provetes de solo é feita com recurso a transdutores piezoelétricos, nomeadamente *bender elements*. Os *bender elements* permitem a medição de ondas de modo simples e não destrutivo, exigindo apenas uma pequena penetração na base e no topo da amostra, não afetando as suas características de resistência e rigidez. Estes transdutores eletromecânicos são constituídos por finas placas piezocerâmicas que geram e detetam ondas sísmicas (Dyvik e Madshus, 1985; Viana da Fonseca e Ferreira, 2002b).

Neste trabalho foi utilizado um par de *bender elements* “de bancada”, instalados numa base e num topo adaptados, que permitem a medição das ondas nos provetes a ensaiar. As leituras das velocidades das ondas foram realizadas imediatamente após a extrusão dos tubos de amostragem, com o provete acondicionado num tubo PVC e devidamente selado para armazenamento. A Figura 9 apresenta os equipamentos necessários para a medição da velocidade das ondas, que inclui um gerador de funções no qual se define a configuração da onda gerada, aparelhos *multiplexer* de transmissão e receção que permitem gerir os canais dos transdutores e amplificar os sinais recebidos, um osciloscópio que permite observar e registar ambos os sinais das ondas transmitida e recebida, um computador com o software WaveStar® para aquisição e interpretação dos resultados e um par de *bender elements*, constituído por um transmissor e um recetor, na base e no topo, respetivamente.

O sinal transmitido no transdutor emissor corresponde a uma onda sinusoidal de frequência pré-definida, que atravessa a amostra e é recebido no transdutor recetor, no extremo oposto da amostra. A velocidade da onda S é obtida pela razão entre a distância percorrida (calculada a partir da altura total da amostra, deduzida da altura dos próprios *bender elements*) e o tempo de propagação da onda S, usando o método da medição direta da primeira chegada (Viana da Fonseca e Ferreira, 2002b;



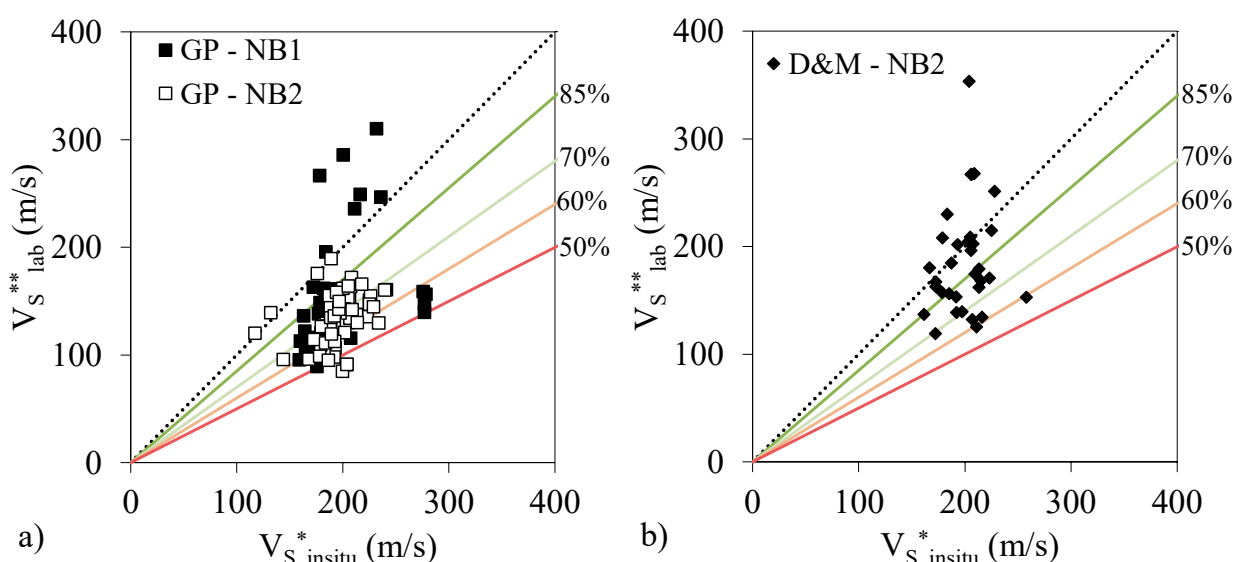
Lee e Santamarina, 2005). Durante os ensaios de *bender elements* na bancada foram medidos e registados quatro sinais com diferentes frequências (entre 1 e 8 kHz), com o objetivo de diminuir as incertezas na interpretação das ondas sísmicas, como sugerido por Viana da Fonseca et al. (2009).



**Fig. 9** – Esquema do ensaio com *bender elements* de bancada

### 5.3 – Resultados e discussão

Os resultados da comparação das velocidades das ondas S medidas em campo e no laboratório encontram-se na Figura 10, para os dois locais NB1 e NB2 e para os dois amostradores utilizados, GP e D&M. Apesar de terem sido recolhidas amostras com o D&M nos dois locais apenas as amostras recolhidas no local NB2 foram ensaiadas no laboratório. Adicionalmente, esta figura apresenta algumas linhas de referência, que correspondem aos limites considerados na classificação da qualidade de amostras proposta por Ferreira et al. (2011), definidos no Quadro 1.



**Fig. 10** – Resultados da avaliação da qualidade de amostragem com os amostradores: a) Gel-Push; b) Dames & Moore

**Quadro 1** – Classificação da qualidade de amostras baseada no rácio de  $V_S$  (Ferreira et al., 2011)

Zona de qualidade	$V_S^*_{lab}/V_S^*_{insitu}$	Qualidade da amostra
A	$\geq 0.85$	Excelente
B	0.85 - 0.70	Muito boa
C	0.70 - 0.60	Boa
D	0.60 - 0.50	Razoável
E	$< 0.50$	Fraca

Através dos resultados é possível concluir que apenas 23% das amostras recolhidas com o Gel-Push (GP) se encontram com qualidade inferior a 60% (boa qualidade). Por outro lado, apenas 2 amostras recolhidas com o Dames & Moore (D&M) apresentam qualidade inferior a 60%, refletindo o melhor desempenho do amostrador D&M.

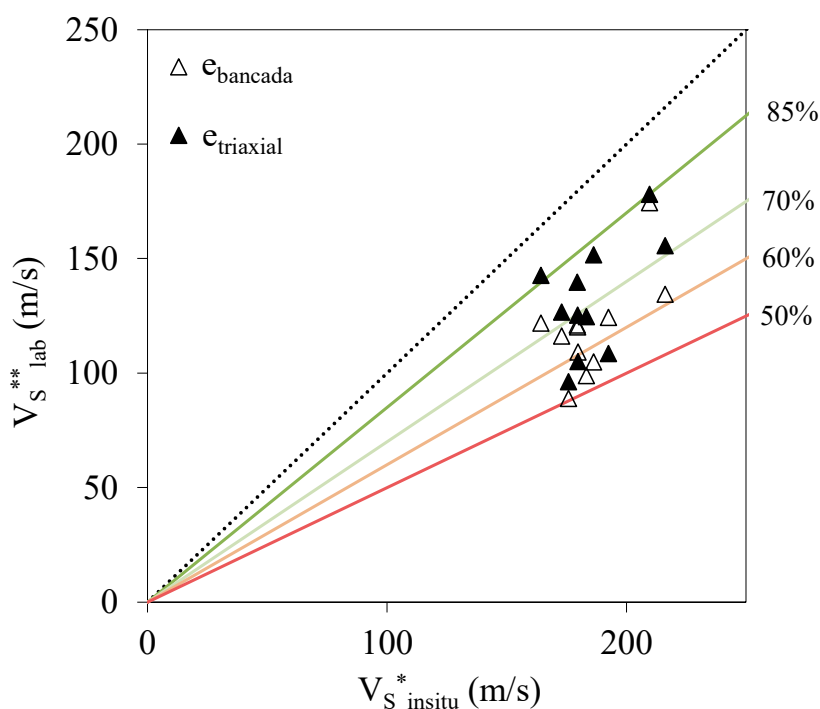
No entanto, 18% das amostras recolhidas com GP no NB1, 6% das recolhidas com GP no NB2 e 33% das recolhidas com D&M apresentam qualidade superior a 100%, um resultado inesperado (e de facto irrealista) que pode ser justificado por erros relacionados com a determinação do índice de vazios em campo, baseada em correlações empíricas a partir do CPTu. Analisando com mais pormenor estas amostras, conclui-se que apresentam um índice de vazios em laboratório muito elevado (estão muito soltas) ou são amostras compostas por argilas e solos finos, por vezes com camadas intercaladas de areias e argilas. A consideração de valores contantes de altura e diâmetro dos provetes pode também influenciar a determinação do volume e por sua vez condicionar a determinação rigorosa do índice de vazios em laboratório.

De modo a ultrapassar estas limitações, e obter índices de vazios mais precisos, algumas amostras foram selecionadas para serem ensaiadas no equipamento triaxial. Neste equipamento é reestabelecido o estado de tensão médio *in situ* da amostra de solo, em condições isotrópicas, e é possível determinar o índice de vazios de forma precisa, uma vez que o peso seco das amostras é determinado com rigor no final do ensaio, após retirar a amostra do equipamento. O índice de vazios no final da consolidação, considerado igual ao final do ensaio uma vez que o corte é realizado em condições não drenadas, é assim determinado rigorosamente através das variações de volume medidas ao longo do ensaio.

De modo a avaliar a influência da determinação do índice de vazios na qualidade das amostras estudadas, o índice de vazios obtido no início dos ensaios triaxiais, correspondendo ao estado inicial da amostra aquando da medição da velocidade das ondas S, foi utilizado na normalização dos resultados. Os resultados das velocidades das ondas obtidos com os *bender elements* de bancada normalizados com o índice de vazios admitido inicialmente ( $e_{bancada}$ ) e o índice de vazios determinado de forma inversa, através do ensaio triaxial ( $e_{triaxial}$ ) estão ilustrados na Figura 11.

A Figura 11 mostra que a maioria das amostras apresenta melhor qualidade quando se utiliza o índice de vazios obtido a partir do ensaio triaxial, uma vez que o estado de tensão é conhecido e controlado e a determinação do índice de vazios é mais precisa. A imprecisão no cálculo do índice de vazios e do teor em água das amostras após extrusão faz com que a sua qualidade não seja estimada com o maior rigor, daí a importância de ensaiar as amostras com procedimentos mais avançados.

Apesar disso, a medição da velocidade das ondas S com os *bender elements* de bancada é muito importante para uma análise preliminar das condições da amostra, permitindo selecionar de forma expedita as amostras de melhor qualidade, que serão testadas em ensaios avançados a realizar posteriormente.



**Fig. 11** – Comparação entre qualidade de amostragem utilizando o índice de vazios inicial de bancada e o determinado através do ensaio triaxial para normalização da velocidade das ondas S

## 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A recolha de amostras de alta qualidade de solos arenosos é um desafio, uma vez que os processos de amostragem podem resultar em grandes alterações na estrutura das amostras, afetando a sua representatividade em relação às condições *in situ*. Essa representatividade é ainda mais pertinente e relevante no caso presente da avaliação laboratorial da suscetibilidade à liquefação, pelo que a verificação da qualidade de amostragem é um passo fundamental na validação dos resultados obtidos em laboratório. Assim, neste trabalho foram utilizadas duas técnicas avançadas de amostragem, nomeadamente os amostradores Dames & Moore e Gel-Push, para recolha de solos suscetíveis à liquefação. As amostras foram recolhidas num campo experimental localizado no Vale Inferior do Tejo, no município de Benavente. Observou-se que os dois amostradores foram eficazes na recolha de solos com potencial de liquefação, particularmente em areias médias, areias finas, areias siltosas e siltes arenosos, bem como em solos argilosos. No entanto, estes amostradores não foram adequados para a amostragem de cascalhos ou solos com resistência de ponta ( $q_c$ ) superior a 8 MPa, uma vez que se verificou a perda total do material do interior do tubo de amostragem e danos na sapata de corte dos dois equipamentos. A taxa de recuperação do D&M foi bastante superior à do GP, pelo que se concluiu que o D&M tem uma melhor repetibilidade que o GP-S, que se deve ao menor comprimento do tubo amostrador (50 cm) e à geração de vácuo pelo anel vedante durante o processo de extração, que protege a amostra e evita a perda de material durante a recuperação do equipamento.

A avaliação da qualidade das amostras recolhidas foi feita através da comparação das velocidades das ondas sísmicas medidas no campo e em laboratório, com recurso a *bender elements*. A análise foi considerada preliminar, uma vez que as velocidades das ondas em laboratório foram medidas em amostras logo após a sua extrusão dos tubos amostradores, pelo que as condições de estado e densidade relativa são difíceis de avaliar com rigor. De modo a validar a comparação dos resultados, foi feita uma normalização para ter em conta o efeito do estado de tensão e do índice de vazios. Concluiu-se que ambos os amostradores foram competentes na recolha de amostras de areia

solta e areia siltosa, uma vez que a maioria das amostras apresenta boa qualidade. Foi também observado que as amostras recolhidas com o D&M apresentam qualidade superior às recolhidas com o GP. A determinação de índices de vazios precisos é essencial para uma avaliação da qualidade das amostras mais rigorosa. De qualquer forma, conclui-se que a análise preliminar realizada com os *bender elements* de bancada é essencial para selecionar e identificar as amostras mais representativas, isto é, com menores perturbações e de maior qualidade, para serem ensaiadas em equipamentos avançados.

## 7 – AGRADECIMENTOS

O 4º autor, investigador responsável pelo projeto europeu LIQUEFACT reconhece que indiretamente este sucesso foi possível graças às verbas de financiamento que financiaram os trabalhos no sítio-piloto onde se desenvolveu o microzonamento sísmico, mas agradece especialmente à Fundação de Ciência e Tecnologia (FCT) pelo apoio através do projeto PTDC/ECM/GEO/1780/2014 “Liquefaction Assessment Protocols to Protect Critical Infrastructures against Earthquake Damage: LIQ2PROEARTH”, que coordenou com investigador responsável. A 1ª autora e o 2º autor agradecem também à FCT as bolsas de doutoramento SFRH/BD/120035/2016 e SFRH/BD/146265/2019, respectivamente. Este trabalho foi apoiado pelo Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC), de que a 3ª autora é investigadora.

## 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, J.; Guerreiro, L.; Bento, R.; Lopes, M.; Proença, J. (2010). *Seismic vulnerability of lifelines in the greater Lisbon area*. Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 8, nº1, pp. 157-180. <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9124-7>
- Bray, J. D.; Sancio, R. B. (2006). *Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 132, nº9, pp. 1165-1177. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:9\(1165\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:9(1165))
- Bray, J. D.; Markham, C. S.; Cubrinovski, M. (2017). *Liquefaction assessments at shallow foundation building sites in the Central Business District of Christchurch, New Zealand*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 92, pp. 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.09.049>
- Chen, C.-C.; Lee, W. F.; Chen, J.-W.; Ishihara, K. (2014). *Liquefaction potential of non-plastic silty sand*. Journal of Marine Science and Technology, vol. 22, nº2, pp. 137-145. <https://doi.org/10.6119/JMST-013-0117-3>
- Chung, R.M.; Yokel, F.Y.; Wechsler, H. (1984). *Pore pressure build up in resonant column tests*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 110, nº2, pp. 247-261. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1984\)110:2\(247\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:2(247))
- Dyvik, R.; Madhus, C. (1985). *Lab Measurements of Gmax Using Bender Elements*. Proceedings ASCE Annual Convention: Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions, Detroit, Michigan, pp. 186-197.
- Ferreira, C. (2003). *Implementação e aplicação de transdutores piezoelétricos na determinação de velocidades de ondas sísmicas em provetes. Avaliação da qualidade de amostragem em solos residuais*. Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. FEUP, Portugal.

- Ferreira, C.; Viana da Fonseca, A.; Nash, D. (2011). *Shear wave velocities for sample quality assessment on a residual soil*. Soils and Foundations, vol. 51, nº4, pp. 683-692. <https://doi.org/10.3208/sandf.51.683>
- Ferreira, C.; Viana da Fonseca, A.; Ramos, C.; Saldanha, A. S.; Amoroso, S.; Rodrigues, C. (2020). *Comparative analysis of liquefaction susceptibility assessment methods based on the investigation on a pilot site in the greater Lisbon area*. Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 18, nº1, pp. 109-138. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00721-1>
- Foti, S.; Strobbia, C.; Rix, G.J.; Lai, C. (2014). *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization* (1st ed.). CRC Press. pp. 487. <https://doi.org/10.1201/b17268>
- Gouveia, F.; Viana da Fonseca, A.; Carrilho Gomes, R.; Teves-Costa, P. (2018). *Deeper Vs profile constraining the dispersion curve with the ellipticity curve: A case study in Lower Tagus Valley, Portugal*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 109, pp. 188-198. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.03.010>
- Hardin, B.O.; Richart, F.E.Jr. (1963). *Elastic wave velocities in granular soils*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 89, nº1, pp. 33-65.
- Hight, D. W. (2000). *Sampling Methods: Evaluation of Disturbance and New Practical Techniques for High Quality Sampling in Soils*. 7º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto.
- Ishihara, K.; Harada, K.; Lee, W. F.; Chan, C. C.; Safiullah, A. M. M. (2016). *Post-liquefaction settlement analyses based on the volume change characteristics of undisturbed and reconstituted samples*. Soils and Foundations, vol. 56, nº3, pp. 533-546. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.04.019>
- Iwasaki, T.; Tatsuoka, F.; Takagi, Y. (1978). *Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading*. Soils and Foundations, vol. 18, nº1, pp. 39-56. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.18.39>
- Jamiolkowski, M.; Masella, A. (2015). *Geotechnical characterization of a tailings deposit in Poland—an update*. In S. Marchetti, P. Monaco, & A. Viana da Fonseca (Eds.), 3rd International Conference on the Flat Dilatometer, pp. 25-42. Rome, Italy.
- Jorge, C.; Vieira, A. (1997). *Liquefaction Potential Assessment - Application to the Portuguese Territory and to the Town of Setúbal*. Seismic Behaviour of Ground and Geotechnical Structures, Seco and Pinto (Eds.). pp. 33-43.
- La Rochelle, P.; Sarrailh, J.; Tavenas, F.; Roy, M.; Leroueil, S. (1981). *Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive clays*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 18, nº1, pp. 52-66. <https://doi.org/10.1139/t81-006>
- Ladd, C. C.; DeGroot, D. J. (2003). *Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization: Arthur Casagrande Lecture*. Proceedings of 12<sup>th</sup> Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 55, Cambridge, United States of America.
- Lai, C.; Bozzoni, F.; Conca, D.; Famà, A.; Özcebe, A. G.; Zuccolo, E.; Meisina, C.; Bonì, R.; Bordoni, M.; Cosentini, R. M.; Martelli, L.; Poggi, V.; Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C.; Rios, S.; Cordeiro, D.; Ramos, C.; Molina Gómez, F.; Coelho, C.; Logar, J.; Maček, M.; Oblak, A.; Ozcep, F.; Bozbey, I.; Oztoprak, S.; Sargin, S.; Aysal, N.; Oser, C.; Kelesoglu, M. K. (2020). *Technical guidelines for the assessment of earthquake induced liquefaction hazard at urban scale*. Bulletin of Earthquake Engineering, Special Issue: The H2020 European Project LIQUEFACT, <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00951-8>



- Landon, M. M.; DeGroot, D. J.; Sheahan, T. C. (2007). *Nondestructive Sample Quality Assessment of a Soft Clay Using Shear Wave Velocity*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 133, n°4, pp. 424–432. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2007\)133:4\(424\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:4(424))
- Lee, J. -S.; Santamarina, J. C. (2005). *Bender Elements: Performance and Signal Interpretation*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 131, n°9, pp. 1063–1070. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:9\(1063\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:9(1063))
- Lee, W. F.; Ishihara, K.; Chen, C.-C. (2012). *Liquefaction of silty sand – preliminary studies from recent Taiwan, New Zealand, and Japan earthquakes*. Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, pp. 747–758, Tokyo.
- Lo Presti, D. C. F.; Pallara, O.; Lancellota, R.; Armandi, M.; Maniscalco, R. (1993). *Monotonic and cyclic loading behaviour of two sands at small strains*. Geotechnical Testing Journal, vol. 16, n°4, pp. 409–424. <https://doi.org/10.1520/GTJ10281J>
- Markham, C. S.; Bray, J.; Riemer, M.; Cubrinovski, M. (2016). *Characterization of Shallow Soils in the Central Business District of Christchurch, New Zealand*. Geotechnical Testing Journal, vol. 39, n° 6, pp. 20150244. <https://doi.org/10.1520/GTJ20150244>
- Molina-Goméz, F.; Ferreira, C.; Ramos, C.; Viana da Fonseca, A. (2020). *Performance of Gel-Push sampling in liquefiable soils*. Géotechnique Letters, vol. 10, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00073>
- Mori, K.; Sakai, K. (2016). *The GP sampler: a new innovation in core sampling*. In Lehane, Acosta-Martínez, and Kelly (eds) Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 5. pp. 99–124, Sydney, Australia.
- Osterberg, J. O. (1973). *An improved hydraulic piston sampler*. In 8<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 317–321, Moscow.
- Robertson, P. K. (2009). *Interpretation of cone penetration tests - a unified approach*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 46, n° 11, pp. 1337–1355. <https://doi.org/10.1139/T09-065>
- Robertson, P. K.; Cabal, K. L. (2010). *Estimating soil unit weight from CPT*. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Cone Penetration Testing, pp. 1–8, Huntington Beach, CA, USA.
- Saldanha, A. S.; Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2018). *Microzonation of the liquefaction susceptibility: case study in the lower Tagus valley*. Geotecnia, vol. 142, pp. 07–34. <http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.142.01>
- Santamarina, J.C.; Klein, K.A.; Fam, M.A (2001). *Soils and waves - Particulate materials behavior, characterization and process monitoring*. John Wiley & Sons, New York.
- Taylor, M. L.; Cubrinovski, M.; Haycock, I. (2012). *Application of new “Gel-push” sampling procedure to obtain high quality laboratory test data for advanced geotechnical analyses*. In 2012 NZSEE Conference, pp. 1–8, Christchurch, New Zealand.
- Teves-Costa, P.; Batlló, J. (2011). *The 23 April 1909 Benavente earthquake (Portugal): macroseismic field revision*. Journal of Seismology, vol. 15, n°1, pp. 59–70. <https://doi.org/10.1007/s10950-010-9207-6>
- Umehara, Y.; Chiaro, G.; Kiyota, T.; Hosono, Y.; Yagiura, Y.; Chiba, H. (2015). *Effectiveness of “Gel-Push” Sampling Technique to Retrieve Undisturbed Sandy Specimens for Liquefaction*

Test. 6<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand.

- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2001). *Gestão da qualidade de amostragem em solos residuais e em solos argilosos moles, por análise comparativa de velocidades de ondas sísmicas in situ e em laboratório*. Actas da Workshop "Técnicas de Amostragem em Solos e Rochas Brandas e Controlo de Qualidade", FEUP, Porto, Portugal.
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2002a). *Aplicação da técnica de bender elements para avaliação da qualidade de amostragem em solos residuais*. Actas do XII COBRAMSEG, vol. 1, pp. 187-199. São Paulo, Brasil.
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C. (2002b). *Bender elements como técnicas laboratoriais excelentes para avaliação de parâmetros geotécnicos referenciais*. Actas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Viana da Fonseca, A.; Pineda, J. (2017). *Getting high-quality samples in "sensitive" soils for advanced laboratory tests*. Innovative Infrastructure Solutions, vol. 2, nº1, pp. 1-34. <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0086-3>
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C.; Fahey, M. (2009). *A framework interpreting bender elements, combining time-domain and frequency-domain methods*. Geotechnical Testing Journal, vol. 32, nº 2, 100974. <https://doi.org/10.1520/GTJ100974>
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., Ramos, C. (2018). *Report on ground characterization of the four areas selected as testing sites by using novel techniques and advanced methodologies to perform in situ and laboratory tests*. Deliverable D 2.1 of the European H2020 LIQUEFACT research project, pp. 2:1-111.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., Coelho, C., Quintero, J., Rios, S., Millen, M., Cordeiro, D. (2019a). *Microzonation of the Lisbon Area in Portugal. Methodology for assessment of earthquake-induced risk of soil liquefaction at the four European testing sites (microzonation)*. Deliverable D 2.7 of the European H2020 LIQUEFACT research project, chpt. 3, pp. 63-157 (www.liquefact.eu: consultado em abril 2021).
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C.; Ramos, C.; Molina-Gómez, F. (2019b). *The geotechnical test site in the greater Lisbon area for liquefaction characterisation and sample quality control of cohesionless soils*. AIMS Geosciences, vol. 5, nº2, pp. 325-343. <https://doi.org/10.3934/geosci.2019.2.325>
- Viana da Fonseca, A.; Molina-Gómez, F.; Ferreira, C.; Ramos, C. (2019c). *Getting high-quality samples for liquefaction testing in Portugal*. Final Report, LIQ2PROEARTH – PTDC/ECM-GEO/1780/2014, pp. 104 (<https://web.fe.up.pt/~viana/Final%20Report%20Exp%20Site%20Liq2ProEarth.pdf>: consultado em maio 2021)
- Yoshimi, Y., K. Tokimatsu and J. Ohara (1994), *In Situ Liquefaction Resistance of Clean Sands over a Wide Density Range*, Géotechnique, vol. 44, nº3, pp. 479-494. <https://doi.org/10.1680/geot.1994.44.3.479>