

INSTRUMENTAÇÃO AXIAL E RADIAL EM ENSAIOS TRIAXIAIS NO DOMÍNIO DAS PEQUENAS DEFORMAÇÕES

Araújo, N.¹; Gomes Correia, A.¹

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho



RESUMO

A maior parte das deformações dos solos ocorre para níveis de deformação entre 0.01 % a 0.5 %, tornando-se fundamental uma correcta caracterização do comportamento dos solos e geomateriais para este domínio de pequenas deformação. Para a determinação do comportamento geotécnico nestes domínios, é indispensável nos ensaios triaxiais a utilização de instrumentação local para a eliminação de erros derivados do efeito de confinamento do provete, de fenómenos de flexão e deformação do sistema de ensaio. Uma técnica de instrumentação eficaz e de baixo custo consiste na utilização de Local Deformation Transducer (LDT). Neste artigo apresenta-se a sua eficiência na monitorização de ensaios triaxiais monotónicos a trajectória controlada, e cíclicos, ilustrando-se métodos para o registo da deformação radial. São ainda ilustrados casos de estudo com o intuito de validar a sua eficiência, nomeadamente ensaios em trajectória de tensões controladas e ensaios cíclicos.

1- INTRODUÇÃO

1.1 - Pequenas deformações

Apesar de alvo de investigação desde a década de 80, reduzida atenção é prestada ao comportamento mecânico dos solos para baixos níveis de deformação no instante de dimensionamento de estruturas geotécnicas. Como consequência, a eficiência dos modelos de previsão do comportamento ao longo do seu período de vida torna-se reduzida. Estudos realizados por Vinale et al. (2001) demonstraram que a caracterização para baixos níveis de deformação é fundamental para permitir uma correcta avaliação do estado de tensão durante o período de vida. Apesar de as deformações durante a fase construtiva serem elevadas, as deformações na estrutura em serviço serão reduzidas devido a grande rigidez dos solos e

geomateriais compactados. Burland (1989), Jardine et al. (1984), Balay et al, (1997) e Gomes Correia e Biarez (1999) justificam que, mesmo não atendendo ao comportamento não linear e fluência, é fundamental uma correcta definição do comportamento dos solos e geomateriais para níveis de deformação inferiores a 0.1 %.

Segundo Jardine et al. (1991), o comportamento dos solos é passível de divisão em quatro domínios fundamentais, designando-se o primeiro por comportamento elástico linear. Trata-se do comportamento associado a um muito baixo domínio de deformação, e requer técnicas de instrumentação de elevada precisão, i.e., capazes do registo de deformações da ordem dos 10^{-6} a 10^{-5} . A determinação de parâmetros mecânicos

neste baixo domínio de deformação requer cuidados laboratoriais que limitem os erros derivados da técnica laboratorial. Burland (1989) e Gomes Correia (1985, 2004) constataram que, para níveis de deformação inferiores a 0.1 %, a instrumentação externa subestima a real rigidez dos solos e geomateriais. Torna-se então necessário o recurso a técnicas de instrumentação local, i.e., técnicas em que a deformação é obtida sobre uma fracção do provete, de modo a remover erros induzidos pelo confinamento do extremo do provete, fenómenos de rotação do topo e base e deformação do sistema de ensaio (Jardine et al. 1984).

1.2 - Instrumentação

A caracterização dos parâmetros necessários à caracterização de solos e geomateriais no domínio elástico pode ser realizado por recurso às relações tensão-extensão obtidas laboratorialmente. Para tal é possível recorrer a ensaios estáticos, em condições monotónicas ou cíclicas, ou a ensaios dinâmicos (ensaios geofísicos).

No âmbito dos ensaios triaxiais salientam-se como técnicas usuais para instrumentação local o recurso a transdutores piezoeléctricos, os transdutores de efeito de Hall, os Linear Variable Differential Transformer (LVDT) e os Local Differential Transducer (LDT) (Gomes Correia et al. 2006). Burland e Symes (1982) recorreram a transdutores electrolíticos para o registo de deformações da ordem dos 10^{-5} , Gomes Correia (1985) utilizou LVDTs de pequenas dimensões, e Clayton et al. (1989) a transdutores de efeito de Hall. No laboratório de Geotecnia da Universidade do Minho (DECUM) optou-se pela utilização de um transdutor desenvolvido no laboratório de Engenharia Geotécnica do Instituto de Ciências Industriais da Universidade de Tóquio e designado por LDT. Trata-se de um transdutor capaz do registo de deformações desde 10^{-6} a 10^{-2} , de fácil construção, baixo custo, fácil aplicação no provete (leves), insensível à temperatura e água (Goto et al. 1991). Estudos realizados por Hoque et al. (1997) confirmaram a sua estabilidade a longo

prazo, histereses, durabilidade em condição de submersão pressurizada e resolução. A não opção por transdutores de efeito de Hall residuiu na sua inferior resolução e sensibilidade a ruídos eléctricos e de temperatura. Os transdutores LVDT não foram adoptados pela difícil colocação nos provetes (induzida pelo seu peso). Gomes Correia et al. (2006) refere que os transdutores piezoeléctricos apresentam incertezas na interpretação das leituras.

2- LDT

2.1 - Descrição

A instrumentação local é realizada no DECUM por recurso a LDTs (Fig. 1). Trata-se de um transdutor composto por uma tira fina e flexível de fósforo e bronze na qual se aplicam de cada lado 1 ou 2 extensómetros. A liga utilizada na tira é composta por uma mistura de fósforo e bronze submetida a tratamento térmico de modo a ampliar o seu domínio elástico. As variações de distância entre as suas extremidades originam deformações na fina tira de cobre e fósforo, resultando numa variação da resistência eléctrica dos extensómetros e consequente desequilíbrio da ponte de Wheastone.

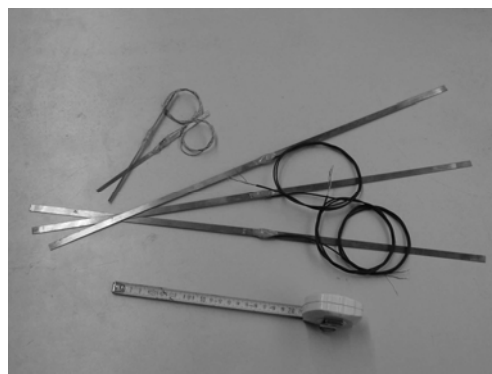


Fig. 1 – LDTs construídos na Universidade do Minho.

2.2 - Deformação axial

O registo da deformação axial em provetes cilíndricos/prismáticos pode ser realizado por recurso a LDTs. Goto et al. (1991) descreve os cuidados que garantam o bom funcionamento do transdutor, sendo unicamente necessário definir o

comprimento do mesmo. Nos ensaios triaxiais com instrumentação local recomenda-se que o comprimento do transdutor ronde os $2/3$ da altura do provete. Relativamente ao número de transdutores axiais, e apesar de desejável a utilização de 3 transdutores espaçados de 120° , é considerado admissível o recurso a 2 espaçados de 180° (Fig. 2). Cada transdutor é suportado no provete por recurso a pseudo-articulações coladas à membrana.

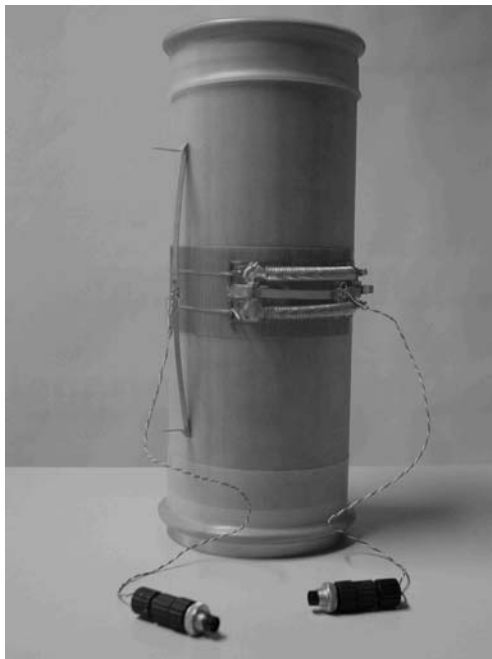


Fig. 2 – Instrumentação axial e radial realizada por Araújo (2007) por recurso a LDTs.

2.3 - Instrumentação radial

A deformação radial em ensaios triaxiais pode ser realizada por recurso a três técnicas distintas, nomeadamente: anel articulado em contacto com o provete em dois pontos, cinta instrumentada ou instrumentação directa.

A utilização de um anel articulado, amplamente utilizada com transdutores de efeito de Hall, pode ser facilmente utilizada com LDTs. Contudo, a sua natureza pesada, o reduzido espaço disponível nas câmaras triaxiais convencionais e a medição do diâmetro unicamente em 2 pontos do provete limitam a sua utilização. A Fig. 3 apresenta um esquema de instrumentação por recurso a esta técnica donde se constata, como

vantagem, a majoração dos incrementos de diâmetro. A Eq. (1) traduz a relação entre a leitura do LDT e o diâmetro do provete. Alternativamente pode-se recorrer à utilização de uma cinta instrumentada (Fig. 4.a) para medição do diâmetro. Trata-se de um sistema dotado de um LDT para registo das variações de perímetro do provete. Como desvantagem salienta-se o facto da relação entre o diâmetro e a leitura do LDT não ser linear (Eq. 2). É necessária a aproximação a um polinómio para implementação em código computacional. Tal deve-se a que o cálculo da secção do provete, interveniente nos ensaios de trajectória controlada, afecta a quantificação da tensão de desvio. Esta limitação implica recalibrações a cada alteração da geometria da cinta, inviabilizando ajustes iniciais em função do provete a ensaiar. Como vantagens, relativamente ao anel articulado, salienta-se o seu baixo peso e a quantificação do diâmetro com base no registo do diâmetro, leitura esta de superior fiabilidade que a leitura em dois pontos. Nos ensaios realizados por Araújo (2007) e Grégoire et al. (2009) optou-se pela introdução de um elemento redutor de atrito (tira de teflon) entre a cinta e a membrana de látex. Araújo e Gomes Correia (2009) salientam que a introdução deste elemento origina nos ensaios cíclicos de baixa deformação (induzidos por incrementos de tensão inferior a 10 kPa) imprecisão por ajustes com a membrana de látex. Neste sentido realizaram estudos com instrumentação radial directa (Fig. 5.b). Baseando a medição da deformação radial no mesmo conceito da medição axial, torna-se necessário ultrapassar o obstáculo da medição sobre uma superfície não planar. Apesar da utilização de provetes prismáticos ser desejável para medição da deformação radial, a utilização de provetes cilíndricos é por vezes imposta. Neste sentido, Araújo e Gomes Correia (2009) utilizam o esquema apresentado na Fig. 5 para determinação do diâmetro com base nas leituras do LDT. Admitindo que a deformação radial é isotrópica no plano horizontal é possível a dedução da Eq. (3) para determinação do diâmetro com base na deformação do LDT. Mais se salienta

que sendo a relação linear, a sua aplicação em código computacional é directa e ajustes na geometria inicial do sistema de medição possíveis. Relativamente às desvantagens, salienta-se a medição em dois pontos que não definem uma diagonal e possíveis rotações das pseudo-articulações. Como vantagem salienta-se a medição directa no provete, simplicidade e baixo peso.

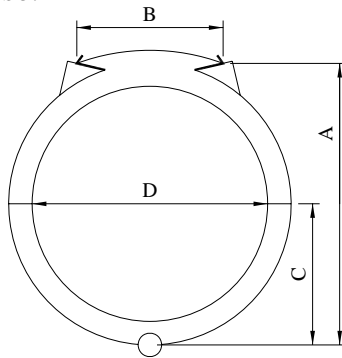
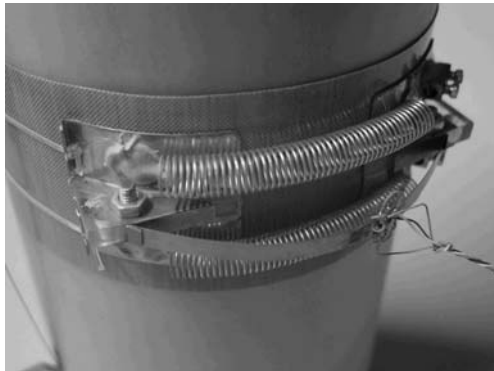
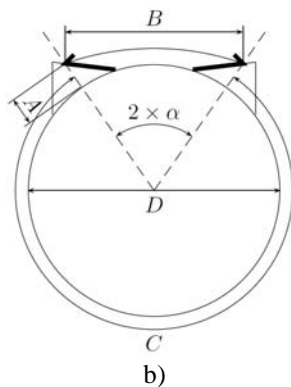


Fig. 3 – Esquema do sistema de medição radial por recurso a um anel articulado.

$$D = D_0 + (B - B_0) \cdot \frac{C}{A} \quad (1)$$



a)

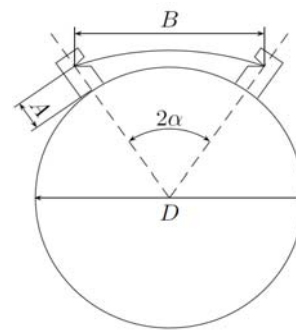


b)

Fig. 4 – a) Medição radial por recurso a uma cinta e b) esquema do sistema de medição radial com cinta (Araújo 2007).



a)



b)

Fig. 5 – a) Medição radial por recurso a leitura directa do LDT e b) esquema do sistema de medição radial com cinta (Araújo e Gomes Correia 2009).

$$C = 2 \cdot A \cdot \left(\frac{B}{B_0} - 1 \right) + D_0 \cdot \frac{B}{B_0} \quad (3)$$

3- CAMPANHA DE ENSAIOS

3.1 - Solos ensaiados

No decurso deste artigo são apresentados resultados, obtidos no DECUM com instrumentação local, de ensaios a trajectória controlada para estudo do domínio de elasticidade e ensaios

cíclicos para estudo do comportamento irreversível. Relativamente a resultados de ensaios monotónicos, constatou-se a não adequabilidade do transdutor.

Relativamente aos estudos a trajectória controlada, são apresentados resultados relativos a uma areia siltosa, designada por areia de Perafita. Trata-se de um solo já alvo de estudo num projecto de cooperação França – Portugal, numa primeira fase através do Instituto Superior Técnico e numa segunda fase com a Universidade do Minho, com a “École Centrale Paris”. Reis Ferreira (2003) classificou o solo como não plástico, com um coeficiente de uniformidade de $C_u = 17$ e um coeficiente de curvatura $C_c = 1.85$. A densidade das partículas sólidas foi definida igual a 2.69. Os parâmetros de compactação, relativamente ao ensaio Proctor modificado realizado por Fleureau et al. (2002), são: teor em água óptimo $\omega = 13.2 \%$, massa volúmica seca $\gamma_d = 1890 \text{ kg/m}^3$ e índice de vazios $e = 0.42$. As amostras foram construídas com peso volúmico $\gamma = 18.9 \text{ kN/m}^3$, índice de vazios 0.56 e teor em água $\omega = 13 \%$. Com a opção por um peso volúmico inferior ao apresentado por Fleureau et al. (2002) pretendeu-se representar as condições “in situ”, com um teor em água inferior ao definido no ensaio de compactação. Os provetes foram construídos num molde com 100 mm diâmetro e 200 mm de altura, sendo a compactação realizada em 5 camadas.

Os ensaios cíclicos utilizados para validação da eficiência dos LDT foram realizados sobre uma escória de aciaria, designada a nível nacional por Inert Steel Aggregate for Construction (ISAC). Para a sua classificação, Gomes Correia et al. (2009) recorreu a normas e especificações nacionais. Neste sentido a granulometria foi obtida segundo a especificação E-196 e os limites de Atterberg segundo a norma NP-143. O ISAC (0/19) ensaiado apresenta 8.5 % de material entre 0.06 mm e 2 mm (areia), 75 % entre 2 mm e 60 mm (cascalho) e 1.5 % entre 60 mm e 200 mm. A curva granulométrica, bem graduada, apresenta coeficiente de uniformidade $C_u = 9.64$, coeficiente de curvatura $C_c = 1.95$,

diâmetro efectivo $d_{10} = 1.96$ e um diâmetro máximo das partículas de 76.1 mm. Os parâmetros de compactação relativamente ao ensaio Proctor modificado são: teor em água óptimo $\omega = 3.45 \%$ e peso volúmico seco $\gamma_d = 23.90 \text{ kN/m}^3$. Os provetes, construídos por recurso a moldes com 300 mm altura e 150 mm diâmetro, foram compactados em 6 camadas para um teor em água $\omega = 2.8 \%$, peso volúmico seco $\gamma_d = 23.25 \text{ kN/m}^3$ e índice de vazios inicial $e = 2.37$.

3.2 - Ensaio monotónicos

Como já referido, a utilização de LDTs para realização de ensaios triaxiais não é possível. Segundo Hoque et al. (1997) o nível de formação a impor no transdutor não deve exceder 2 %. Trata-se de um valor insuficiente para a realização de ensaios monotónicos, os quais podem atingir deformações da ordem dos 20 %.

3.3 - Ensaio a trajectória controlada

A realização de ensaios com trajectória controlada foi realizada no DECUM recorrendo ao sistema de controlo desenvolvido por Araújo (2007) e Araújo e Gomes Correia (2009). Com esse sistema capaz da aplicação, no espaço p-q, de qualquer trajectória, foram definidas 6 trajectórias a estudar. Para cada trajectória, e para distintos valores do estado de tensão inicial p_0 - q_0 , foram aplicados ciclos de carga/descarga incrementados de 2 kPa até se verificar a abertura do ciclo. Para cada incremento de amplitude o ciclo foi repetido 10 vezes.

Os ensaios realizados nestas condições foram instrumentados com 2 LDT axiais e 1 LDT para instrumentação radial. Numa primeira fase a medição da instrumentação radial foi realizada por recurso a uma cinta (Fig. 4.a). Contudo, atendendo a pequenos ajustes no sistema, este foi alterado para medição directa da deformação radial (Fig. 5.a). Os resultados apresentados neste trabalho são relativos à utilização deste segundo sistema.

3.4 - Ensaios cíclicos

No âmbito do desenvolvimento de um sistema triaxial de grandes dimensões, o DECUM procedeu a ensaios triaxiais cíclicos segundo a metodologia descrita na norma europeia EN 13286-7, mais precisamente segundo Método B – HSL, i.e, ensaio a pressão de confinamento constante e tensão deviatórica elevada. Trata-se de um procedimento de ensaio composto por duas fases: acondicionamento do provete e carregamento cíclico para determinação do comportamento resiliente. Durante o acondicionamento o provete é submetido a uma pressão de confinamento constante e igual a 70 kPa. Após estabilização da extensão axial uma solicitação deviatórica sinusoidal é aplicada entre 5 kPa a 345 kPa durante 20 000 ciclos. Na segunda fase a pressão de confinamento é reduzida para 20 kPa e mantida constante enquanto a tensão de desvio varia sinusoidalmente. O valor da amplitude varia entre 20 kPa a 100 kPa segundo os patamares estabelecidos na EN 13286-7. Para cada patamar os ciclos são repetidos 100 vezes. Uma vez realizados os patamares associados a um certo nível de pressão de confinamento, o seu valor é elevado para a próxima fase (de 35 kPa até 150kPa) e o processo repetido.

Os ensaios realizados nestas condições foram instrumentados com 2 LDT axiais e 1 LDT radial. A instrumentação radial foi realizada por recurso a uma cinta instrumentada atendendo a que o nível de deformação espectável era de 10^{-4} a 10^{-3} , não se prevendo por conseguinte imprecisões nos dados adquiridos.

4- ANÁLISE DE RESULTADOS

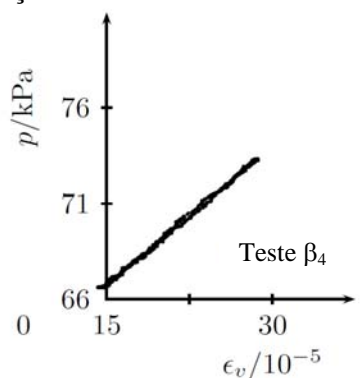
4.1 - Ensaios a trajectória controlada

Os resultados patentes na Fig. 6, aqui apresentada para estudo da eficiência do comportamento dos LDT no estudo do domínio elástico de solos e geomateriais, foram realizados para um estado de tensão inicial (p_0, q_0) = (66.7 kPa, 50 kPa). Da sua

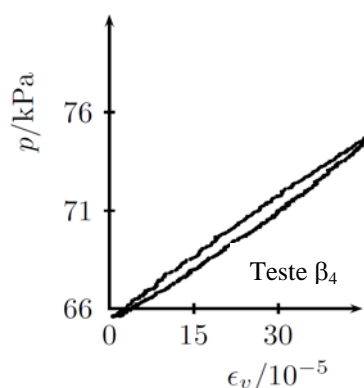
análise é possível definir o limite do domínio elástico, assim como o módulo de deformabilidade volumétrico. Constata-se também o baixo ruído do transdutor e a boa estabilidade do mesmo. Em termos mais quantitativos é possível definir, com base no ensaio realizado, um domínio de elasticidade (para este estado de tensão inicial e trajectória de tensão) $\epsilon_v = 28 \cdot 10^{-5}$ e módulo volumétrico $K = 27$ MPa.

4.2 - Ensaios cíclicos

Relativamente aos ensaios cíclicos analisou-se a eficiência dos transdutores no estudo das deformações irreversíveis, por aquisição da deformação axial e radial, tendo-se constatado a estabilização no registo da deformação axial, assim como a evolução da extensão volumétrica, sendo esta obtida por recurso à medição da deformação radial.



a) Ciclo fechado



b) Ciclo aberto

Fig. 6 – Quantificação do limite elástico em ensaio triaxial com trajectória a tensão de desvio constante (Araújo e Gomes Correia 2009).

Relativamente à análise dos ciclos de carga e descarga realizados após o acondicionamento do provete, constatou-se a ausência de deformações permanentes e

deformações radiais 10 vezes inferiores às deformações axiais, sendo por conseguinte possível determinar o coeficiente de Poisson.

5- CONCLUSÕES

Ensaaios triaxiais com trajectória de tensões controlada e cíclicos foram realizados, respectivamente, sobre um solo arenoso e um geomaterial para estudo da estabilidade e precisão da aplicação de LDTs como transdutores de medição de deformações locais.

Constatou-se a eficiência do transdutor no estudo do comportamento reversível, irreversível e da identificação do domínio elástico. A utilização desta técnica permitiu a quantificação de propriedades mecânicas, nomeadamente o módulo volumétrico e o coeficiente de Poisson, parâmetros de interesse na definição de leis do comportamento.

O registo da deformação radial foi implementado pela introdução do LDT em métodos já existente, nomeadamente o anel articulado e a cinta instrumentada. Verificou-se que, no domínio das pequenas deformações a opção pela utilização de uma cinta instrumentada poderá induzir imprecisão. Tal facto não foi registado nos estudos cíclicos associados a níveis de deformação mais elevados.

Resumindo, constatou-se a eficiência do sistema na monitorização da deformação irreversível, reversível assim como a caracterização de parâmetros mecânicos elásticos, estudos de grande importância na definição e calibração de leis de comportamento.

6- AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar o seu agradecimento a Eng. Sandra Ferreira pela sua contribuição para o estudo da eficiência das técnicas apresentadas na monitorização e interpretação dos resultados dos ensaios cíclicos.

7- REFERÊNCIAS

- Araújo, N. 2007. Desenvolvimento de equipamento triaxial de precisão para obtenção do limite elástico de geomateriais, Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Universidade do Minho.
- Araújo, N. e Gomes Correia, A. 2009. Precision triaxial equipment for the evaluation of the elastic behavior of soils, Proceedings of 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Illinois.
- Balay, J., Gomes Correia, A., Jouve, P., Hornych, P. e Paule, J.L. 1997. Mechanical behaviour of soils and unbound granular materials, modeling of flexible pavements – recent advances, Proceedings of 8th International Conference on Asphalt Pavements, International Society for Asphalt Pavements.
- Burland, J.B. e Symes, M.J. 1982. A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus, *Géotechnique*, 32, 62-65.
- Burland, J.B. 1989. Small is beautiful – the stiffness of soils at small strains, *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 499-516.
- Clayton, C. Khatrush, S., Bica, A. e Siddique, A. 1989, The use of Hall effect semiconductor in geotechnical instrumentation, *Geotechnical Testing Journal*, 12, 69-76.
- E 196: ESPECIFICAÇÃO LNEC. 1966. Solos: análise granulométrica.
- EN 13286-7: EUROPEAN STANDARD. 2004. Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures.
- Fleureau, J.M., Hardiwardoyo, S. Dufour-Laradan, E., Langlois, V. e Gomes Correia, A. 2002. Influence of suction on the dynamic properties of a silty sand, Proceedings of 8^o Congresso Nacional de Geotecnia, Universidade do Porto.
- Gomes Correia, A. 1985. Contribution a l'étude mécanique des sols soumis a des chargements cycliques, Tese de Doutoramento, École National des Ponts et Chaussées.
- Gomes Correia, A. e Biarez, J. 1999. Stiffness properties of materials to use in pavements and rail track design, Proceedings of XIIth European Conference on Soils Mechanics and Geotechnical Engineering – Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure.

- Gomes Correia, A. 2004. Características de deformabilidade dos solos que interessam à funcionalidade das estruturas, *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 100, 103-122.
- Gomes Correia, A., Reis Ferreira, S.M. e Araújo, N. 2006. Triaxiais de precisão para determinação das características de deformabilidade, *Proceedings of 10th Congresso Nacional de Geotecnia*, Universidade Nova de Lisboa.
- Gomes Correia, A., Reis Ferreira, S., Roque, A. e Cavalheiro, A. 2009. Processed Portuguese steel slags: a new geomaterials, *Proceedings of 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Illinois.
- Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., You-Seong, K. e Sato, T. 1991. A simple gauge for small strain measurements in the laboratory, *Soils and Foundation*, 31, 169-180.
- Grégoire, C., Dethy, B., Detry, J. e Gomes Correia, A. 2009, *Proceedings of 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Illinois.
- Hoque, E., Sato, T. e Tatsuoka, F. 1997. Performance evaluation of LDT's for use in triaxial tests, *Geotechnical Testing Journal*, 20, 149-167.
- Jardine, R.J., Symes, M.J. e Burland, J.B. 1984. The measurements of soil stiffness in the triaxial apparatus, *Géotechnique*, 34, 323-340.
- Jardine, R.J., John, D., Hight, D.W. e Potts, D.M. 1991. Some practical applications of non-linear ground model, *Proceedings of 10th ECSMFE*.
- NP 143: NORMA PORTUGUESA. 1969. Solos: determinação dos limites de consistência
- Reis Ferreira, S.M. 2003. Influência da não saturação e da granulometria nas características de deformabilidade de um agregado granítico, *Tese de Mestrado*, Instituto Superior Técnico.
- Vinale, F., Onofrio, A., Mancuso, C., Magistris, F.S. e Tatsuoka, F. 2001. The pre-failure behaviour of soils as construction material, *Proceedings of Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Swets & Zeitlinger.