

EFEITO DA ESTRUTURA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SOLOS DE UM SAPRÓLITO GRANÍTICO

EFFECT OF THE STRUCTURE IN THE MECHANICAL BEHAVIOR OF THE GRANITICE SAPROLITE SOILS

Rodrigues, Carlos, *IPG, Guarda, Portugal, crod@ipg.pt*

Lemos, Luís, *FCTUC, Coimbra, Portugal, llemos@dec.uc.pt*

RESUMO

Neste trabalho os resultados da execução de ensaios edométricos e de compressão K_0 em câmara triaxial, sobre amostras intactas e reconstituídas colhidas ao longo de um perfil de meteorização, de um saprólito granítico localizado na Guarda (Portugal), são analisados e discutidos. A discussão dos resultados permitiu verificar a existência de contribuições de ambas as parcelas da estrutura (ligações interparticulares/cimentação e fábrica/porosidade) no controlo do comportamento mecânico.

ABSTRACT

The results of the oedometric and triaxial compression tests on intact and reconstituted samples collected in the weathered zone of a saprolitic granite localized in Guarda (Portugal), were analyzed and discussed. It can be concluded that, both structural parts (fabric/porosity and inter particle bounding/cement) play a role on the mechanical behaviour.

1. INTRODUÇÃO

Os solos saprolíticos resultam de processos de meteorização “in situ” dos maciços rochosos e apresentam estruturas herdadas da rocha de mãe, as quais influenciam o seu comportamento mecânico. A estrutura destes materiais compreende dois elementos fundamentais, as ligações interparticulares, que dependem da natureza da cimentação, bem como da composição químico-mineralógica, e a fábrica, que engloba o arranjo das partículas, distribuição e tamanho dos poros. No caso dos materiais graníticos a evolução do grau de meteorização faz com que as ligações interparticulares primárias entre grãos se rompam e que um conjunto de vazios intergranulares seja criado. Subsequentemente, a meteorização torna os feldspatos e micas instáveis permitindo a sua lixiviação, criando-se assim uma rede de vazios intragranulares. Por outro lado, os minerais mais estáveis, principalmente os grãos de quartzo são ligados por intermédio de grãos de feldspatos e micas intensamente meteorizados e portanto instáveis, formando um esqueleto sólido por vezes bastante aberto.

2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SAPRÓLITO EM ESTUDO

O ambiente climático da zona em estudo (Guarda, região Nordeste de Portugal) caracteriza-se por ser húmido temperado, o que possibilita que o processo de meteorização seja intenso, transformando o maciço granítico num manto arenoso de elevada permeabilidade. O embebimento em água permite que, durante o Verão, estação em que as chuvas são escassas, a

base dos perfis de alteração permaneça húmida, criando-se assim condições que permitem uma constante e evolutiva arenização do substrato rochoso. Da observação de alguns dos taludes, localizados na área em investigação, é possível registar que o saprólito apresenta na generalidade uma tonalidade clara em tons branco-acinzentados, sendo no entanto visível uma tonalidade mais amarelada na parte superficial do perfil. Por vezes ocorrem manchas, ou mesmo zonas de maior dimensão em que essa tonalidade amarelada surge em tons mais fortemente alaranjados, associados a diferentes micro-ambientes de meteorização. Na Figura 1 apresentam-se algumas características físicas dos solos presentes ao longo do perfil, as quais revelam a existência de uma apreciável homogeneidade.

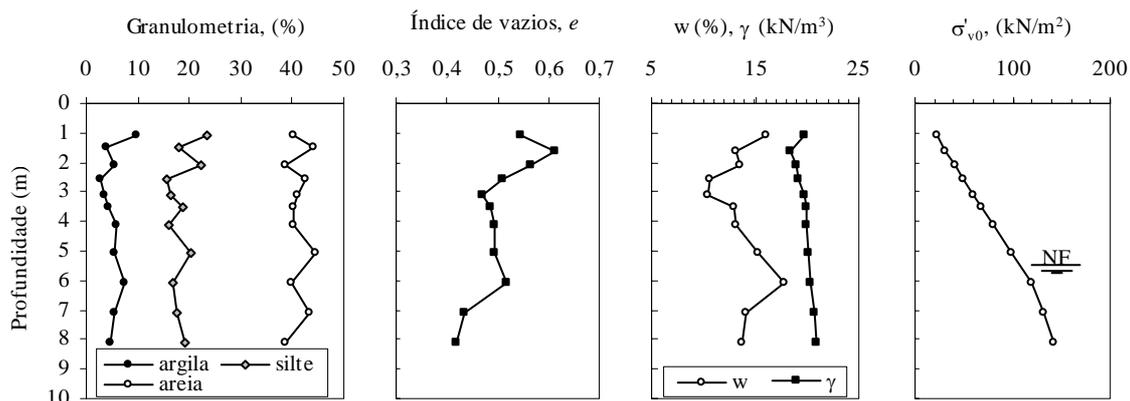


Figura 1 – Características granulométricas e índices físicos dos solos saprolíticos.

Os resultados obtidos indicam tratar-se, na generalidade, de solos bem graduados, que se classificam como sendo areias siltosas (SM), segundo o Sistema de Classificação Unificada (ASTM). Os finos classificam-se como ML, o que traduz a diminuta plasticidade revelada por estes solos. Da análise da Figura 1 pode concluir-se da existência de uma tendência para um incremento em profundidade do peso volúmico (γ) e a conseqüente redução do índice de vazios (e). Os teores em água (w) enquadram-se em termos médios entre 10 e 18 %, correspondendo-lhes graus de saturação enquadrados entre 55 e 94 %. Esta realidade traduz a evolução decrescente do grau de meteorização dos materiais em profundidade e a existência de processos lixiviantes importantes na parte mais superficial do perfil. Foi avaliada a posição do nível freático (NF) recorrendo a um medidor eléctrico, tendo-se verificado que este se situava a uma profundidade compreendida entre os 5,0 m e os 6,5 m.

3. ENSAIOS EDMÉTRICOS

Foram inicialmente executados ensaios edométricos em solos desestruturados, provenientes de amostras colhidas em bloco, à superfície. Posteriormente foram executados ensaios em amostras indeformadas as quais foram colhidas com recurso a amostrador de paredes finas, de 100 mm de diâmetro interno [1], às seguintes profundidades: à superfície, a 0,5 m, a 1,5 m, a 3,0 m, a 4,5 m e a 6,0 m, as quais foram sujeitas a ensaios edométricos, num aparelho de elevada capacidade de carga.

3.1 Ensaios edométricos em amostras desestruturadas

A desestruturação das amostras colhidas em bloco constou da desagregação manual dos solos, que previamente tinham sido secos ao ar. Após a desagregação, tentou-se constituir quatro

amostras com diferentes estados de compactação inicial. Para tal, foi concebida uma amostra com teor em água natural, compactada no anel edométrico com pilão de borracha (amostra Desest- W_n). Para além desta, foram constituídas outras duas amostras com teor em água igual ao correspondente índice de vazios relativo e_R , definido por Vaughan [2], previamente determinado para este solo ($We_r = 23\%$), em dois estados diferentes de compactação – um estado de compactação reduzido (amostra Desest- W_{LL1}), resultante da colocação do material no anel de forma solta, e outra num estado de compactação mais elevado, em que se tentou atingir um índice de vazios próximo do estado de compactação *in situ* (amostra Desest- W_{LL2}). Uma quarta amostra foi preparada com teor em água natural e com estado de compactação da mesma ordem de grandeza do encontrado *in situ* (Desest- e_0). As características das amostras desestruturadas apresentam-se no Quadro 1 e os resultados dos ensaios na Figura 2.

Quadro 1. Características físicas de amostras desestruturadas sujeitas a ensaios edométricos.

Amostra	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	S (%)	e_0
Desest- W_n	100	40	13,5	17,1	15,0	49,8	0,71
Desest- W_{LL1}	112	45	23,5	17,0	13,7	71,0	0,86
Desest- W_{LL2}	100	40	26,4	19,2	15,2	99,9	0,69
Desest- e_0	112	45	16,7	18,9	16,2	74,6	0,59

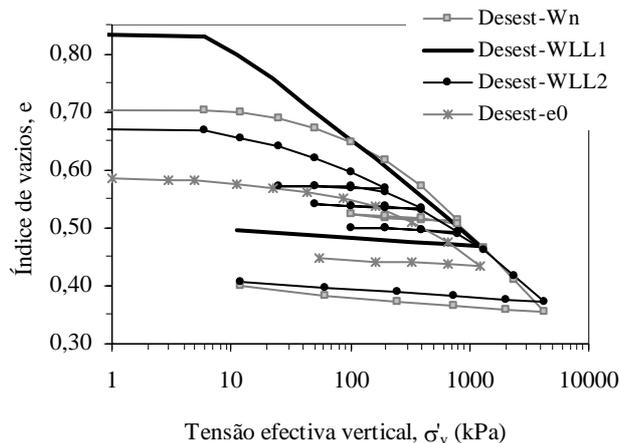


Figura 2 – Curvas de compressibilidade relativas a quatro amostras desestruturadas.

A Figura 2 permite identificar comportamentos distintos nas amostras desestruturadas. As amostras concebidas com teor em água correspondente ao e_r , definido por Vaughan [2], (Desest- W_{LL1} e Desest- W_{LL2}) apresentam tendência para uma sobreposição da linha “normalmente consolidada”. Relativamente às restantes amostras verifica-se que o ramo linear da curva de compressibilidade da amostra Desest- W_n tende a divergir das restantes e que o ramo linear da amostra Desest- e_0 apresenta-se paralelo ao das amostras reconstituídas com teor em água igual ao do índice de vazios relativo (e_r). Verifica-se deste modo, a não coincidência das curvas de compressibilidade das amostras reconstituídas, mesmo após serem atingidas tensões elevadas (5 MPa), não sendo visível a existência de unicidade da linha correspondente aos estados reconstituídos. A inexistência de uma única linha “normalmente consolidada” cria algumas dificuldades quando se pretende entender o comportamento dos solos estruturados a partir da sua comparação com o comportamento dos mesmos materiais em condições de completa desestruturação, pelo que é do maior interesse estabelecer a condição de referência do comportamento.

3.2 Ensaio edométrico em amostras estruturadas

Foram colhidas amostras com amostrador de paredes finas, de 100 mm de diâmetro interno [1], às seguintes profundidades: à superfície, 0,5 m, 1,5 m, 3,0 m, 4,5 m e a 6,0 m. Os ensaios edométricos decorreram com incrementos de carga após cada 24 horas, com duplicação da carga anterior, tendo-se no entanto optado por uma maior discretização dos acréscimos de carga nas proximidades do valor da tensão de cedência expectável para estes materiais. No Quadro 2 apresentam-se algumas características físicas das amostras sujeitas aos ensaios edométricos e na Figura 3 apresentam-se as respectivas curvas de compressibilidade.

Quadro 2. Características físicas de amostras indeformadas colhidas ao longo de um furo de sondagem, sujeitas a ensaios edométricos.

Amostra-Prof.(m)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	S (%)	e_0	G_s
Estr1-sup.	112	45	19,3	17,5	14,6	67,1	0,76	2,62
Estr2-0,5 m	100	40	17,4	17,8	15,2	65,8	0,69	2,61
Estr3-1,5 m	100	40	15,0	18,3	15,9	64,2	0,62	2,63
Estr4-3,0 m	100	40	17,9	18,8	15,9	76,8	0,61	2,62
Estr5-4,5 m	100	40	14,0	19,1	16,7	67,3	0,55	2,64
Estr6-6,0 m	100	40	15,9	19,6	16,9	78,5	0,54	2,65

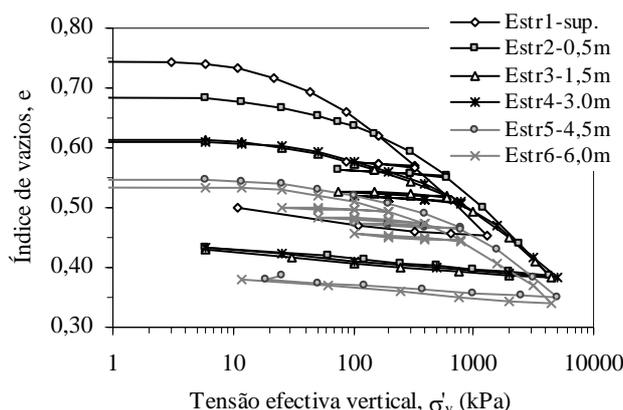


Figura 3 – Curvas de compressibilidade relativas a cinco amostras estruturadas colhidas a diferentes profundidades ao longo de um furo de sondagem.

As curvas de compressibilidade apresentam uma curvatura pouco acentuada, a qual diminui progressivamente à medida que se aumenta a profundidade de colheita. O carácter pouco acentuado da curvatura deverá ser devido ao processo muito gradual da destruição das ligações interparticulares, enquanto que a diminuição do carácter curvilíneo das curvas de compressibilidade, relativas às amostras colhidas a maior profundidade, deve ficar a dever-se à diminuição da influência que as ligações interparticulares desempenham no comportamento, já que esse aumento da profundidade é acompanhado de uma diminuição do índice de vazios.

3.3 Parâmetros de compressibilidade resultantes dos ensaios edométricos

A compressibilidade dos solos saprolíticos estudados caracteriza-se de forma mais correcta recorrendo aos coeficientes de compressibilidade (a_v e m_v) do que aos índices de compressibilidade (C_c e C_s), dado que, por um lado é notório que mesmo para elevadas tensões de carregamento as curvas de compressibilidade evidenciam notória curvatura, não sendo visível de forma categórica a existência de um ramo linear pós-cedência, por outro lado, é

comum que os índices de C_r e C_s , relativos a diferentes ciclos de descarga-recarga, apresentem valores que variam à medida que evolui o estado de tensão. Os valores dos índices de compressibilidade (C_c) e de expansibilidade/recompressibilidade ($C_{s/r}$) foram determinados para cada ensaio, com base nos seguintes princípios:

- os valores do índice C_c referem-se ao último escalão de carga, dada a insuficiente linearidade das curvas de compressibilidade pós-cedência, definida no espaço e - $\log \sigma'_v$;
- os valores de $C_{s/r}$ calculados, referem-se ao gradiente da linha que une o ponto de menor tensão ao ponto correspondente à intersecção do ramo de descarga com o ramo de recarga da respectiva histerese. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros de amostras colhidas a diversas profundidades.

Amostra-Prof.(m)	σ'_{v0} (kN/m ²)	C_c	$C_{s/r}$	$C_{s/r}/C_c$	Escalão de carga inclui σ'_{v0}		σ'_{pv} (kN/m ²)	
					m_v (MPa ⁻¹)	$D=1/m_v$ (MPa)	Pacheco e Silva	Shridaran <i>et al. (1991)</i>
Estr1-sup.	0,1	0,189	0,013	0,069	0,966	1,03	65	104
Estr2-0,5 m	8,9	0,214	0,013	0,062	0,680	1,47	346	395
Estr3-1,5 m	27,0	0,196	0,011	0,055	0,281	3,55	672	605
Estr4-3,0 m	54,8	0,179	0,011	0,063	0,181	5,53	565	575
Estr5-4,5 m	83,2	0,180	0,009	0,050	0,145	6,91	822	840
Estr6-6,0 m	113,1	0,197	0,009	0,044	0,102	9,80	1012	1050

Os valores apresentados no Quadro 3 permitem verificar a existência de uma tendência para uma diminuição da compressibilidade dos solos em profundidade, que é confirmada pela evolução crescente do módulo de compressibilidade unidimensional (D). Do mesmo modo, observa-se o crescimento do valor da tensão de cedência em profundidade, o que indicia que o nível estruturação cresce significativamente ao longo do perfil.

Nas Figuras 4a) e 4b) ilustra-se o procedimento de avaliação da tensão de cedência, segundo a proposta de Décourt [3], baseada no método de Pacheco e Silva (1970), para as amostras colhidas à superfície e aos 6 m de profundidade bem como as curvas de compressibilidade das amostras reconstituídas com o maior e menor índice de vazios.

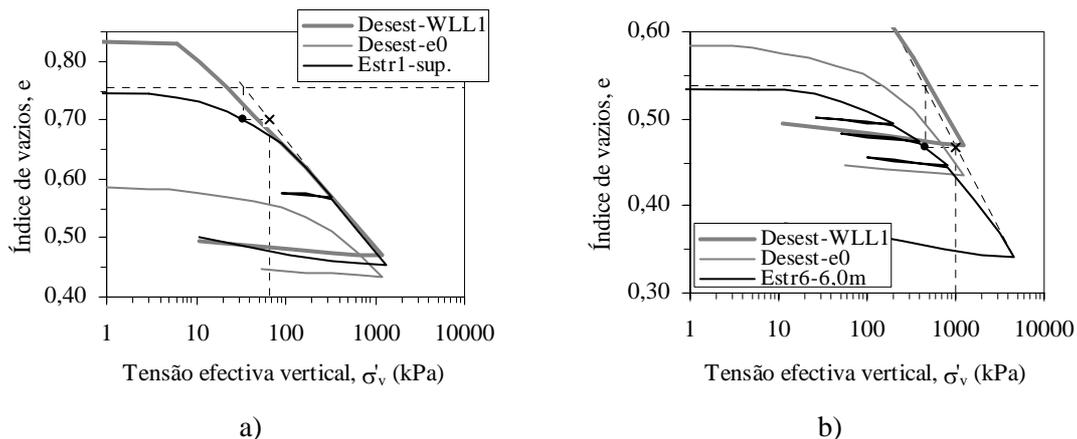


Figura 4 – Tensão de cedência na amostra: a) colhida à superfície, b) colhida a 6m de profundidade.

Da observação da Figura 4 não é visível a existência um ponto de cedência bem definido, o que aliás é igualmente confirmado quando se procede à projecção das curvas de compressibilidade utilizando uma escala linear das tensões. Para além disso, observa-se que o ponto de cedência ocorre antes do solo atingir a curva de compressibilidade das amostras desestruturadas, o que

indicia que o efeito da porosidade sobrepõem-se ao efeito que as ligações interparticulares desempenham no controlo do comportamento mecânico, o que inviabiliza a averiguação do ponto de plastificação da estrutura cimentante, ou que conduz mesmo à conclusão precipitada da não existência de cimentação nos materiais investigados.

Analisou-se o efeito da evolução do índice $C_{s/r}$ em diversos trechos de descarga-recarga relativos a diferentes níveis de tensão. Para tal, desenvolveram-se dois ensaios edométricos, um sobre uma amostra estruturada colhida a 6 m de profundidade e outro sobre uma amostra reconstituída com teor em água igual ao do limite de liquidez. As amostras foram sujeitas a igual sistema de carregamento e a três ciclos de descarga-recarga. Os resultados obtidos apresentam-se nas Figuras 5 a) e b).

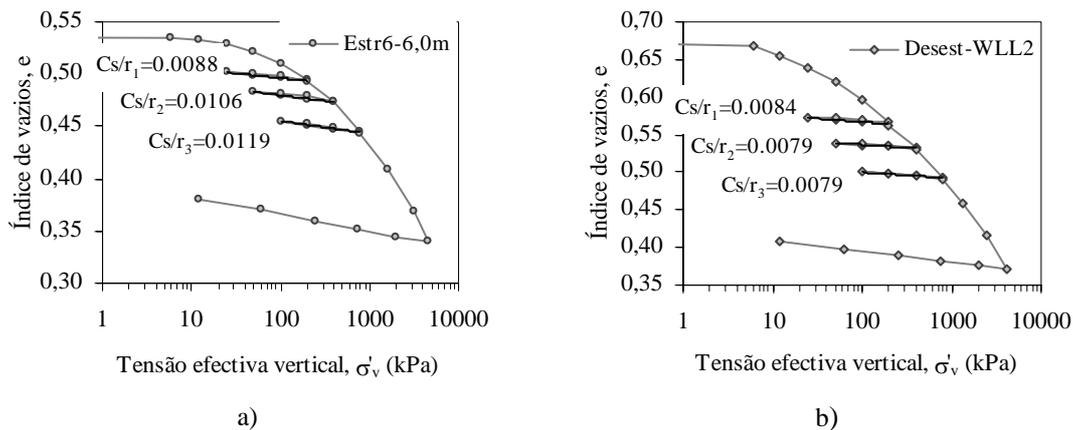


Figura 5 – Evolução do índice de recompressibilidade com o incremento de tensão: a) numa amostra estruturada; b) numa amostra reconstituída.

Da observação da Figura 5 é notória a tendência para a manutenção constante do parâmetro $C_{s/r}$ com o incremento de tensão no caso da amostra reconstituída, o que vem ao encontro do que acontece no caso dos solos granulares não cimentados, e uma tendência para um incremento do valor de $C_{s/r}$ com o aumento do nível de tensão no caso da amostra estruturada, o que ilustra o efeito da comparticipação da estrutura cimentante no controlo do comportamento dos solos estruturados e deixa antever que o incremento de tensão provoca a quebra gradual das ligações interparticulares, ocasionando consequentemente uma diminuição da rigidez do material.

Dado que a comparação das curvas de compressibilidade relativas aos materiais estruturados e desestruturados não permite a caracterização do tipo de estrutura subjacente aos materiais naturais estudados, tal como propuseram Leroueil e Vaughan [4] e Burland [5], uma vez que a plastificação dos materiais naturais ocorre abaixo da linha de compressão intrínseca, tem sido proposta a normalização das curvas de compressibilidade como meio de interpretar o efeito da estrutura na compressibilidade [6], [7]. O procedimento anteriormente referido diz respeito à projecção das curvas de compressibilidade normalizadas no espaço $e/e_0 - \log \sigma'_v$, ou seja, assume-se para parâmetro normalizador o índice de vazios inicial de cada amostra ensaiada. Nestas condições, o máximo valor da deformação volumétrica normalizada, para qualquer solo, é a unidade, o que permite supor que a diferença entre as curvas ocorre devido aos efeitos da estrutura.

Procedeu-se à normalização das curvas de compressibilidade, em relação a e_0 , das amostras estruturadas colhidas ao longo do perfil, bem como das amostras recompactadas a diferentes índices de vazios. Os resultados obtidos que se ilustram na Figura 6 permitem evidenciar os efeitos da presença da estrutura nas amostras estruturadas.

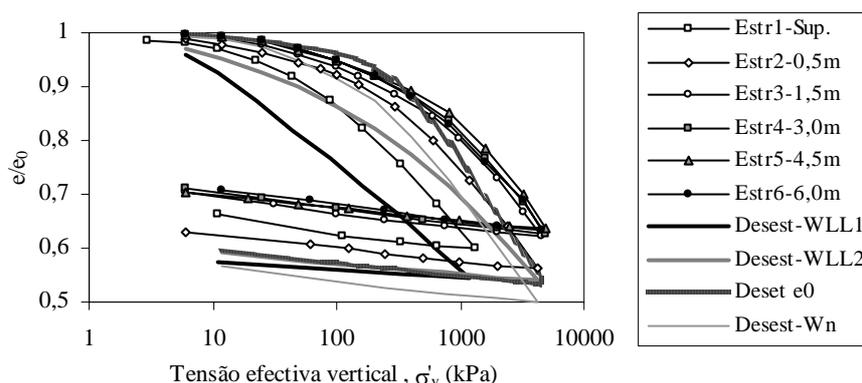


Figura 6 – Curvas de compressibilidade normalizadas, em relação a e_0 , das amostras indeformadas e desestruturadas reconstituídas a diferentes índices de vazios.

Apesar da normalização se apresentar bastante satisfatória para os primeiros estágios do carregamento, relativamente às amostras reconstituídas observa-se, que as suas curvas de compressibilidade normalizadas divergem umas das outras, o que atesta a dificuldade em definir uma única linha de referência correspondente ao estado desestruturado. Relativamente às amostras estruturadas, observa-se que as que foram colhidas nas proximidades da superfície exibem curvas de compressibilidade normalizadas que apresentam um desvio relativamente às colhidas a maiores profundidades. Estas todavia apresentam uma boa concordância, revelando-se quase que coincidentes. No entanto, observa-se que este desvio surge no sentido de uma tendência para um deslocamento para a esquerda à medida que diminui a profundidade de colheita, o que deixa antever a existência de uma diminuição muito acentuada da estruturação dos materiais nas proximidades da superfície. Refira-se igualmente que para as tensões mais elevadas, as curvas normalizadas referentes às amostras estruturadas situam-se à direita das curvas relativas às amostras desestruturadas, o que revela a influência do efeito cimentante das ligações interparticulares no comportamento mecânico.

Na Figura 7 apresenta-se a variação da tensão de cedência em função do índice de vazios inicial das amostras estruturadas colhidas a diferentes profundidades. Nesta figura apresentam-se ainda as curvas de compressibilidade das amostras recompactadas a diferentes índices de vazios.

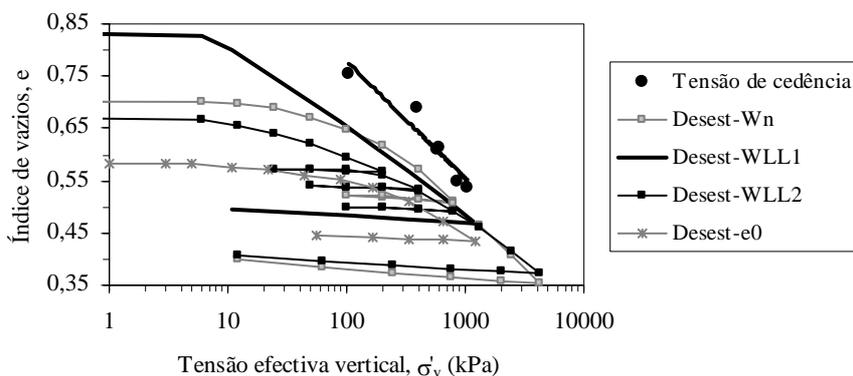


Figura 7 – Variação da tensão de cedência das amostras indeformadas em função de e_0

A Figura 7 sugere que a união dos vários pontos de cedência da estrutura, identificados para diferentes índices de vazios, representa uma envolvente de plastificação da estrutura do tipo BSE (*Bond Strength Envelope*), tal como sugerido por Kavvadas [8], [9]. Observa-se também que a referida linha não parece convergir de forma categórica na direcção da curva de

compressibilidade das amostras reconstituídas, parecendo inclusive que se apresenta sub-paralela à parte linear da curva de compressibilidade da amostra recompackada a índice de vazios natural. Esta situação, segundo os autores, traduz a existência de um grau de cimentação que deverá evoluir de forma crescente com a profundidade.

4. ENSAIOS K_0

Efectuaram-se ensaios K_0 em câmara triaxial, sobre amostras indeformadas colhidas à superfície e às profundidades de 1,0 m e 6,0 m. O controlo das deformações radiais efectuou-se utilizando um anel do tipo Bishop, que acoplava um transdutor de deformação tipo “Hall effect”. As deformações axiais foram avaliadas externamente por intermédio de um LVDT e internamente por um par de transdutores “Hall effect”, diametralmente colocados. A carga axial foi avaliada por intermédio de uma célula de carga submersível com 25 kN de capacidade. A metodologia de execução dos ensaios K_0 encontra-se exposta em Rodrigues [10].

4.1. Resultados obtidos dos ensaios K_0

No Quadro 4 apresentam-se as características físicas das amostras sujeitas aos ensaios K_0 , bem como o valor mínimo registado da relação K_0 .

Quadro 4. Características físicas das amostras sujeitas a ensaios do tipo K_0 .

Amostra	Profundidade	γ (kN/m ³)	W, (%)	e_0	S_0 (%)	$K_{0\text{ min}}$
S ₁	superfície	15,9	15,6	0,87	47,0	0,33
S ₂	1 m	19,6	9,5	0,43	57,4	0,31
S ₃	6 m	20,1	15,1	0,47	83,7	0,27

Na Figura 8 apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios K_0 .

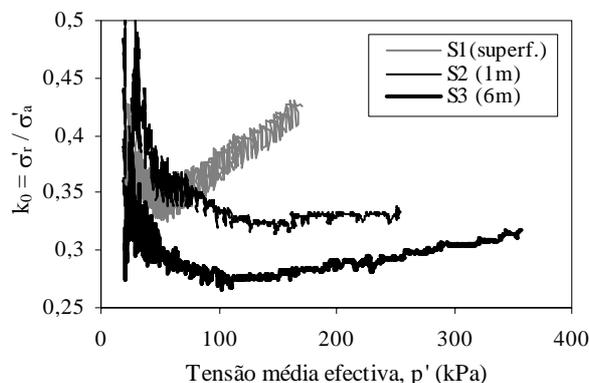


Figura 8 – Evolução dos valores K_0 com o nível da tensão octaédrica de amostras colhidas à superfície e às profundidades de 1m e 6m.

4.2. Análise dos resultados K_0

Analisando a Figura 8, observa-se uma flutuação importante nos valores obtidos de K ($K = \sigma'_r / \sigma'_a$) da amostra S₁ colhida à superfície, o que é explicado por se ter refinado demais o nível de deformação radial permitido sem se proceder à actuação no êmbolo para controlo do ensaio ($-0,0002\% < \epsilon_r < +0,0002\%$), o que originou um nível de actuação muito elevado na pressão do êmbolo, tendo por consequência uma variação muito grande do estado de tensão.

Sublinhe-se que nos ensaios S_2 e S_3 , em que o nível de deformação radial permitido era 10 vezes maior, não se observou este nível exagerado de flutuação das tensões. É igualmente identificável a existência de comportamentos distintos nas três amostras. Relativamente às amostras colhidas nos níveis mais superficiais, as diferenças dever-se-ão sobretudo aos seus diferentes valores do índice de vazios. Refira-se que os valores mínimos de K_0 são da mesma ordem de grandeza, o que indicia que a magnitude das ligações interparticulares das duas amostras é semelhante. Contudo, após ser ultrapassada a zona em que a estruturação das amostras se mantém preservada, é observável um ritmo de crescimento muito mais acentuado da relação K com o nível das tensões na amostra colhida à superfície (com $e_0=0,872$) do que na amostra colhida a 1 m de profundidade ($e_0=0,432$). Este facto deverá estar relacionado com a influência da fábrica e com a forma como se desenvolve a quebra das ligações interparticulares nas duas amostras. A amostra colhida à superfície, dado que apresenta uma estrutura mais aberta, é susceptível de um ritmo muito acelerado de desestruturação, motivado pelo incremento do nível de tensão e conseqüente deformação, o que ocasiona uma evolução crescente do valor de K . A amostra colhida à profundidade de 1 m apresenta um reduzido valor de índice de vazios, a que corresponde uma microestrutura fechada. Assim a desestruturação deverá acontecer neste caso de forma gradual até elevados níveis de tensão, sendo esta controlada fundamentalmente pela fábrica do material, o que explica o facto de a evolução crescente de K ser pouco acentuada.

Comparando os resultados relativos às amostras colhidas às profundidades de 1 m e 6 m, a que correspondem idênticos valores de índice de vazios, 0,43 e 0,47 respectivamente, observa-se que a linha correspondente à evolução do valor de K com o nível de tensão da amostra mais profunda se projecta abaixo da correspondente à amostra mais superficial. Este facto não deverá ser motivado por um controlo da compacidade no comportamento das amostras, até porque a amostra mais profunda apresenta maior índice de vazios, mas provavelmente por estes materiais apresentarem ligações interparticulares mais fortes, obviamente por se encontrarem num estado menos avançado de meteorização. Assim, a um estado de meteorização mais evoluído, a que corresponde uma estruturação menos efectiva (dado que a magnitude das ligações interparticulares é também mais frágil), corresponde de forma evidente um maior valor de K_0 . Observa-se também que a amostra mais superficial e com maior índice de vazios, quando sujeita ao ensaio K_0 , evolui de forma mais acelerada para um verdadeiro estado desestruturado.

Atente-se ainda ao facto de, na fase inicial dos ensaios, ser observável uma anomalia considerável dos valores de K_0 (exemplo do ensaio S_3 , Figura 9) correspondente a um incremento muito rápido deste parâmetro, precedido de imediato de uma diminuição considerável que tende depois a ser atenuada à medida que se incrementa o estado de tensão. Este efeito deverá ser fruto de um conjunto alargado de factores, nomeadamente:

- o ensaio K_0 é iniciado após ser finalizada a fase de condução do estado de tensão da amostra segundo uma trajectória correspondente a p' constante até um valor de K_0 considerado expectável. Ou seja, a alteração da trajectória das tensões, a par da ocorrência de deformações radiais, experimentadas tanto na fase de consolidação isotrópica, como durante o carregamento na trajectória de tensões em que p' se manteve constante, deverão ser responsáveis pelo comportamento inicial dos ensaios em que é imposto o constrangimento da deformação radial;
- a fábrica das amostras comporta um conjunto vasto de poros e fissuras, tanto à escala macroscópica como microscópica, que tendem a ser fechados durante a primeira fase do ensaio, em que se incrementa o estado de tensão, o que deverá ocasionar uma diminuição brusca do valor de K ;
- um outro condicionante provavelmente responsável por este tipo de comportamento refere-se à perturbação das amostras fruto das acções inerentes ao processo de amostragem, cujo principal factor deverá corresponder à zona altamente perturbada da parede circunferencial

das amostras. Como não foi eliminado o material sujeito a níveis distorcionais importantes (motivados pela cravação do amostrador) que desestruturaram por completo as amostras nesta zona, provavelmente também a diminuição do valor de K no início do ensaio fica a dever-se ao adensamento gradual do material perturbado na parede da amostra à medida que é incrementado o nível de tensão.

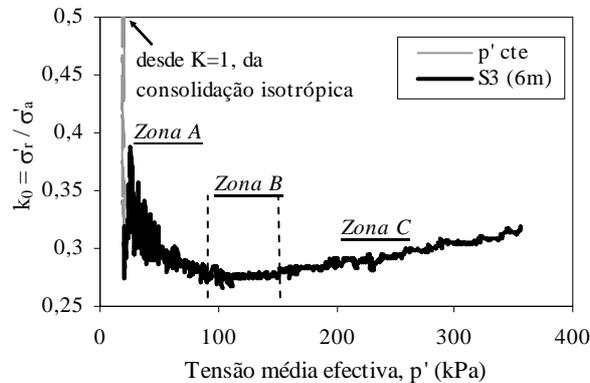


Figura 9 – Evolução dos valores K com o nível da tensão octaédrica correspondente ao ensaio desenvolvido numa amostra indeformada colhida à 6m de profundidade.

O comportamento observado dos ensaios K_0 revelou a existência de três fases distintas de que é exemplo o ensaio na amostra S_3 (6m) ilustrado na Figura 9:

- uma primeira (Zona A), em que é visível alguma instabilidade, já anteriormente justificado;
- uma segunda fase (Zona B), a que pertence um patamar mínimo dos valores K, correspondente ao valor K_0 , o qual deverá ser determinado pelo controlo exercido da estrutura interparticular destes solos,
- uma terceira fase (Zona C), em que é observável o crescimento do valor K à medida que evolui o estado de tensão, o qual deverá ser ocasionado pela progressiva desestruturação das amostras.

Apesar dos níveis de tensão atingidos durante a execução dos ensaios K_0 serem relativamente modestos, obviamente que os níveis de deformação a eles associados conduzem as amostras a estados de desestruturação que tendem a aproximá-las aos correspondentes materiais de natureza eminentemente granular. Para estes materiais Jaky [11] propôs uma expressão que relaciona o valor de K_0 com o ângulo de resistência ao corte, e que seguidamente se apresenta:

$$K_0 = 1 - \sin \phi' ; \text{ (solos normalmente consolidados ou remoldados)}$$

Se considerarmos o valor obtido do ângulo de resistência ao corte, gerado pelos ensaios triaxiais realizados sobre amostras desestruturadas, os quais permitiram o estudo do comportamento intrínseco destes solos saprolíticos, $\phi'_{cs} = 36,0^\circ$ [10], verifica-se que este dá origem a um valor K_0 de:

$$K_0 = 0,412 \text{ (amostras desestruturadas)}$$

Verifica-se assim, que o valor de K_0 correspondente às amostras desestruturadas, avaliado pela expressão de Jaky, é da mesma ordem de grandeza do obtido na amostra colhida à superfície (amostra S_1), em que o valor de K_0 obtido no final do ensaio, ou seja, a um nível de tensão mais elevado (a que deverá corresponder já um estado bastante evoluído de desestruturação da amostra), foi de $K_{m\acute{a}x} = 0,42$.

Por outro lado, o valor de K para as restantes amostras estruturadas, correspondente ao final de cada um dos ensaios, cujos valores se ilustram no quadro 5, afastam-se significativamente do resultante do comportamento intrínseco, o que deverá ser justificado pela preservação da reserva estrutural ao nível das tensões atingidas, significando isto que, quando estão em causa estruturas do tipo das apresentadas pelas amostras colhidas a 1 e 6 m de profundidade, só para elevados níveis de tensões é que o estado verdadeiramente desestruturado é atingido.

Quadro 5 – Valores de K_0 obtidos para o maior nível de tensão atingido nos vários ensaios e respectivos níveis de deformação.

Amostras:	$K_{0\text{ máx}}$	ε_a (%) associada
K_0 – Cam (Superf.)	0,418	1,576
K_0 – Cam (1 m)	0,338	3,057
K_0 – Cam (6 m)	0,318	3,327
K_0 (desestruturadas)	0,412	-

5. CONCLUSÕES

Não foi possível identificar a existência de unicidade da “linha normalmente consolidada”, correspondente aos materiais reconstituídos, pelo que se torna difícil distinguir a influência que as duas parcelas da estrutura – ligações interparticulares e fábrica, desempenham no comportamento dos solos estruturados através da sua comparação com o comportamento intrínseco.

Os resultados obtidos dos ensaios edométricos realizados em amostras colhidas ao longo do perfil de meteorização mostram a existência de uma diminuição da compressibilidade em profundidade. Observou-se igualmente que a tensão de cedência evolui no sentido crescente com a profundidade, facto este que deverá ser provocado não só pelo incremento da magnitude das ligações interparticulares, mas fundamentalmente por um controlo mais efectivo da fábrica, que se traduz por uma diminuição gradual em profundidade do índice de vazios natural.

A cedência correspondente ao início da quebra das ligações interparticulares surge no interior da curva de compressibilidade intrínseca, pelo que não é identificável de forma nítida a sua existência na curva de compressibilidade.

Apesar da compressibilidade dos solos estruturados ser fundamentalmente controlada pela fábrica, existem evidências de que as ligações interparticulares desempenham papel activo, embora menos relevante, no comportamento mecânico, já que os vários ciclos de descarga-recarga desenvolvidos para diferentes níveis de tensão nas amostras estruturadas geram índices de recompressibilidade (C_r) que evoluem de forma crescente com o incremento do nível das tensões, enquanto que no caso das amostras desestruturadas o valor de C_r revela ser aproximadamente constante. Também a normalização das curvas de compressibilidade permitem observar a influência que as componentes de rigidez e resistência desempenham no comportamento dos solos estruturados.

Os ensaios K_0 em câmara triaxial mostraram a existência de valores mínimos de K_0 , que evoluíram desde 0,27, para o caso de uma amostra colhida a 6 m de profundidade, até 0,33, para o caso de uma amostra colhida à superfície. O comportamento observado dos ensaios K_0 revelou a existência de três fases distintas: uma primeira, em que é visível alguma instabilidade, fruto da tentativa de controlo inicial do ensaio, precedida por uma segunda, a que corresponde um patamar mínimo dos valores K_0 , o qual deverá ser determinado pelo controlo exercido da estrutura interparticular destes solos, e uma terceira, em que é observável o crescimento do valor

K_0 à medida que evolui o estado de tensão, o qual deverá ser ocasionado pela progressiva desestruturação das amostras.

Assim, a compressibilidade é controlada fundamentalmente pela resposta volumétrica, que acontece simultaneamente com a quebra gradual das ligações interparticulares à medida que evolui o estado de tensão, não tendo esta tradução imediata na compressibilidade. A cedência definida nestes solos é fundamentalmente controlada pela fábrica, tendo o rompimento das ligações interparticulares um papel menos relevante no controlo desse comportamento.

REFERÊNCIAS

- [1] Rodrigues, C.M.G.; Lemos, L.J.L (2003). *Strength and stress-strain behaviour of saprolitic granite soils from Guarda – sampling effects*. Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials, IS Lyon 03, pp. 663-668.
- [2] Vaughan, P.R.; Maccarini, M.; Mokhtar, S.M. (1988). *Indexing the engineering properties of residual soils*. Quarterly Journal of Engineering Geology, N° 21, pp. 69-84.
- [3] Décourt, L. (1992). *SPT in non classical materials*. Proc. US/Brazil Geotechnical Workshop on Applicability of Classical Soil Mechanics to Structured Soils. pp. 64-100. Eds. Lima, Nieto, Viotti e Bueno. Univ. Fed. Viçosa, Belo Horizonte, Brazil.
- [4] Leroueil, S.; Vaughan, P.R. (1990). *The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks*. Géotechnique 40, N° 3, pp. 467-488.
- [5] Burland, J.B. (1990). *On the compressibility and shear strength of natural clays*. Géotechnique 40, N° 3, pp. 329-378.
- [6] Futai, M.M.; Lacerda, W.A.; Almeida, M.S.S.; Pacheco, A.O. (2002). *Efeitos da estrutura no comportamento tensão-deformação-resistência de um solo saprolítico*. XII COBRAMSEG – I CLBG – III SBMR, Vol. 2, pp. 617-626.
- [7] Martins, F.B.; Bica, A.V.D.; Bressani, L.A.; Coop, M.R. (2002). *Interacção das componentes porosidade e cimentação no comportamento mecânico de um solo arenoso*. XII COBRAMSEG – I CLBG – III SBMR, Vol. 2, pp. 657-669.
- [8] Kavvadas, M.; Anagnostopoulos, A. (1998). *A framework for the mechanical behaviour of structured soils*. Proc. Sec. Int. Symp. on Hard Soils–Soft Rocks, Eds. Evangelista & Picarelli, Balkema, Vol. 2, pp. 591-601. Naples, Italy.
- [9] Kavvadas, M.; Amorosi, A. (2000). *A constitutive model for structured soils*. Géotechnique 50, N° 3, pp. 263-273.
- [10] Rodrigues, C.M.G. (2003). *Caracterização Geotécnica e Estudo do Comportamento Geomecânico de um Saprolito Granítico da Guarda*. Dissertação de Doutoramento, FCTUC, Coimbra, 649 pp.
- [11] Jaki, J. (1944). *The coefficient of earth pressure at rest*. Jour. of the Society of Hungarian Architects and Engineers, pp. 355-358.