

CÉLULA K_0 -UFBA, UMA PROPOSTA PARA OBTENÇÃO DO PARÂMETRO K_0 EM LABORATÓRIO

Cell K_0 -UFBa, a proposal for obtaining K_0 parameter in laboratory

João Carlos Baptista Jorge da Silva ^a

^a Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

RESUMO – O presente trabalho apresenta a célula K_0 -UFBa, onde é mostrado um dispositivo eficiente para a determinação do coeficiente de empuxo no repouso de solos a partir de amostras indeformadas. A célula K_0 -UFBa foi desenvolvida e licenciada no LabGeo da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBa), Brasil. Seus principais componentes e detalhes de montagem são mostrados. O desenvolvimento do equipamento baseou-se nos ensaios de odômetro, porém com confinamento lateral de água, que por ser incompressível, não permite deformação neste sentido, mantendo a condição de K_0 . A fim de avaliar os resultados da célula K_0 em amostras indeformadas obtidas de dois poços escavados em solo residual, esses resultados foram comparados com os ensaios DMT, que foram feitos próximo aos poços. Os resultados mostraram comportamento semelhante ao longo da profundidade em ambas as áreas de ensaio quando comparados com os resultados da célula K_0 e ensaios de campo (DMT). A pequena variação dos valores deve-se principalmente à heterogeneidade do solo residual, associada a fatores como erosão superficial, cimentação devido à presença de óxidos e histórico de tensões originadas da rocha mãe.

ABSTRACT – The present work introduces the K_0 -UFBa cell, which has been shown to be an efficient device for determination of the coefficient of earth pressure at rest of soil from undisturbed samples. The K_0 -UFBa cell was developed and licensed at LabGeo at the Polytechnic School of the Federal University of Bahia (UFBa), Brazil. Its main components and assembly details are shown. The development of the equipment was based on the odometer tests with lateral confinement of water, which as incompressible, does not allow deformation in this direction, maintaining the K_0 condition. In order to evaluate the results of the K_0 cell on undisturbed samples obtained from two wells in residual soil, these results were compared with DMT tests, which were done next to the wells. The results showed similar behavior along the depth at both test areas when compared with K_0 cell results and field tests (DMT). The small variation in the values is mainly due to the heterogeneity of the residual soil, associated to factors such as surface erosion, cementation due to the presence of oxides and history of stresses originating from the mother rock.

Palavras Chave – Empuxo no repouso; ensaio de laboratório, solo residual.

Keywords – Earth pressure at rest; laboratory test, residual soil.

1 – INTRODUÇÃO

O coeficiente de empuxo (K) é a relação entre a tensão efetiva horizontal (σ'_h) e a tensão efetiva vertical (σ'_v) que ocorre no solo ou nos maciços rochosos. Muitas vezes há interesse em conhecer um caso particular em que não haja deformações laterais no elemento dentro do solo ou maciços

E-mail: jcarlos@ufba.br

rochosos (todas as deformações já ocorreram na época geológica de formação do solo ou rocha). Neste caso, o coeficiente é denominado "coeficiente de empuxo no repouso" ou K_0 .

O coeficiente de pressão de terra em repouso, K_0 , é um dos principais parâmetros necessários à aplicação de métodos numéricos aos problemas de escavação, além de ser também essencial para a definição laboratorial dos modelos reológicos utilizados para tentar explicar o comportamento das escavações.

Para a obtenção dos valores de K_0 in situ, a tensão geostática vertical é normalmente considerada e a tensão horizontal obtida de forma direta ou indiretamente. Mesmo nas técnicas de ensaios de campo mais recentes, para obter a tensão horizontal é obrigatório não ignorar as interferências feitas pela introdução do equipamento de medição. Por outro lado, os ensaios laboratoriais também apresentam limitações quanto à alteração do estado de tensões inicial durante a amostragem.

Um extenso estudo das técnicas de obtenção de K_0 em solos foi apresentado por Abdelhamid e Krizek (1976), seja por meio de ensaios de laboratório ou de campo.

Quase sempre, a obtenção dos valores de σ'_h em laboratório é realizada com base em diversos ensaios triaxiais em amostras indeformadas que devem ser consolidadas à tensão efetiva existente "in situ" (Fonseca, 1996; Edil e Dhowian, 1981; Abdelhamid e Krizek, 1976; Massarsch, 1979; Poulos e Davis, 1972; Wroth, 1975; Brooker e Ireland, 1965; Sousa, 2002).

2 – O SOLO RESIDUAL LOCAL

O solo local provém do processo de intemperismo das rochas granulíticas. Solos residuais dessa natureza apresentam particularidades que dificultam a interpretação dos resultados, principalmente: (a) variações sazonais no comportamento, devido à mudança no grau de saturação e, portanto, da sucção para o solo maduro; (b) dificuldades de amostragem e heterogeneidades da rocha superior, no caso de solo jovem.

Mesmo considerando a homogeneidade da rocha mãe, o solo saprolítico resultante ainda não será homogêneo devido à variação do grau de intemperismo com a profundidade. No caso de solos residuais de intemperismo de rochas granulíticas, as discontinuidades litológicas e mineralógicas, herdadas da rocha mãe, impõem processos de intemperismo diferenciais, o que dificulta a adoção de valores de parâmetros geotécnicos.

No caso de valores do coeficiente de empuxo no repouso (K_0), essa determinação de valores torna-se muito mais difícil, uma vez que movimentos tectônicos e intrusões localizadas podem induzir tensões horizontais extremamente altas. Já a ação do intemperismo tende a destruir a estrutura e as tensões existentes na rocha mãe e estabelecer um novo equilíbrio geostático no solo. Dessa forma, estimar quanto dessas tensões poderia ser alterada durante o processo de intemperismo não é uma tarefa fácil.

Segundo Fonseca e Sousa (2002), as propostas para associação de valores de K_0 com parâmetros geotécnicos devem ser encaradas com muita restrição, quando se trata de solos residuais, já que não é de se esperar que alguns desses parâmetros-índice sejam fatores comportamentais determinantes, uma vez que não estão associados à gênese desses geomateriais. Vaughan e Kwan (1984) forneceram, como exemplo, o grau de sobreadensamento (OCR) que não tem, em solos residuais, o mesmo significado que o atribuído em solos sedimentares. Nos solos residuais, o estado de tensões in situ e as características geomecânicas são dependentes dos fenômenos geoquímicos que caracterizam o processo de intemperismo. Logo, os valores relacionados com essas duas grandezas serão mais determinados pela fábrica e estrutura do que pela história de tensões.

3 – ENSAIOS DE CAMPO

Ensaio DMT foram realizados na área de pesquisa, próximos aos dois poços utilizados para obtenção de amostras indeformadas. Para o propósito deste trabalho foram utilizadas duas áreas de ensaios diferentes. O primeiro formado por amostras indeformadas retiradas da encosta acima do

poço #1, e por amostras em sua escavação. Para a primeira área foram realizados os ensaios DMT 03. A segunda área consiste em amostras obtidas do poço #2 e onde foi realizado o DMT 01.

Nos últimos anos, o DMT tem sido largamente utilizado no Brasil como uma ferramenta prática e confiável para a obtenção de parâmetros geotécnicos. O ensaio foi realizado de acordo com a norma americana ASTM (1986) e a norma europeia CEN (2007), não havendo ainda uma norma específica no Brasil.

O equipamento foi orientado em apenas uma direção, visando padronizar a execução dos ensaios. Devido à rigidez da membrana DMT, além de possíveis imprecisões no sistema de medição, o sistema de pressão foi corrigido conforme sugerido por Marchetti e Crapps (1981).

Foram obtidos inicialmente os parâmetros relacionados às pressões corrigidas (p_0 e p_1) e os parâmetros intermediários relacionados ao índice do material (I_d), índice de tensão horizontal (K_d) e módulo dilatométrico (E_d). O coeficiente de empuxo no repouso (K_0), bem como o ângulo de atrito (ϕ'), módulo odométrico (M), módulo de Young (E) e razão de sobreconsolidação (OCR) foram obtidos a partir desses dados.

O ensaio DMT-03 teve sua profundidade limitada a 10m.

4 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Onze amostras indeformadas foram obtidas em diversas profundidades ao longo do talude natural acima do poço #1 e cinco amostras no interior deste e quatro blocos no poço #2. Nos poços #1 e #2 as amostras foram obtidas em cada metro, a fim de fornecer parâmetros geotécnicos que caracterizem o perfil de intemperismo do solo.

4.1 – Célula K_0 -UFBa

A célula K_0 UFBa foi desenvolvida pela equipe técnica do Laboratório de Geotecnia da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBa) e licenciada pelo INPI (série 011080000363).

O desenvolvimento deste equipamento teve como finalidade a realização de ensaios de adensamento vertical com confinamento lateral de água que, por ser incompressível, não permite a deformação nesta direção, mantendo a condição K_0 . A leitura da pressão horizontal é realizada por transdutores que medem a pressão no interior da câmara.

Os principais objetivos da célula eram a obtenção do valor de K_0 de forma simples, com baixo custo e resultados confiáveis. Nas Figuras 1 a 4 a célula K_0 é mostrada com seus componentes principais e detalhes de montagem. As dimensões da célula são: altura 12,0cm e diâmetro 12,3cm.

Para a montagem serão efetuados os seguintes passos:

- Retirada de bloco indeformado no campo;
- Moldagem cuidadosa do corpo de prova com uso de cilindro com bisel em laboratório;
- Colocação da membrana de latex no corpo de prova;
- Inserção do corpo de prova no corpo da célula;
- Fixação da membrana na base inferior da célula;
- Fixação da membrana no topo da célula com auxílio do “colarinho”;
- Inserção do embolo no topo do corpo de prova;
- Preenchimento de água entre a membrana de latex e a parede interna do corpo de prova (válvula 1) e com retirada de bolhas de ar (válvula 2)
- Colocação da célula na prensa.

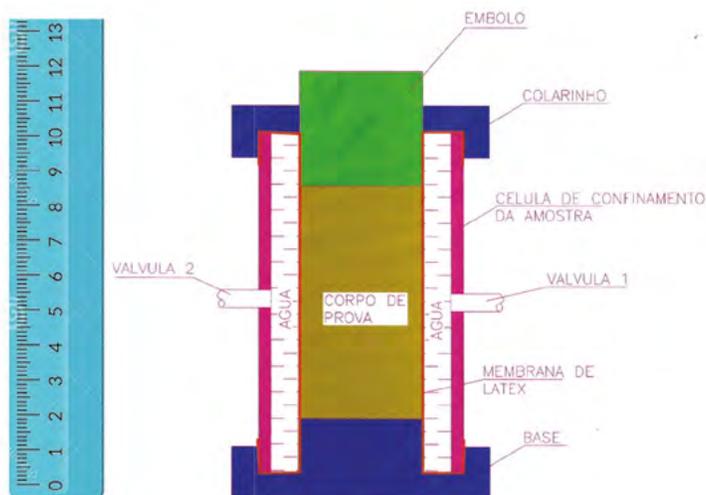
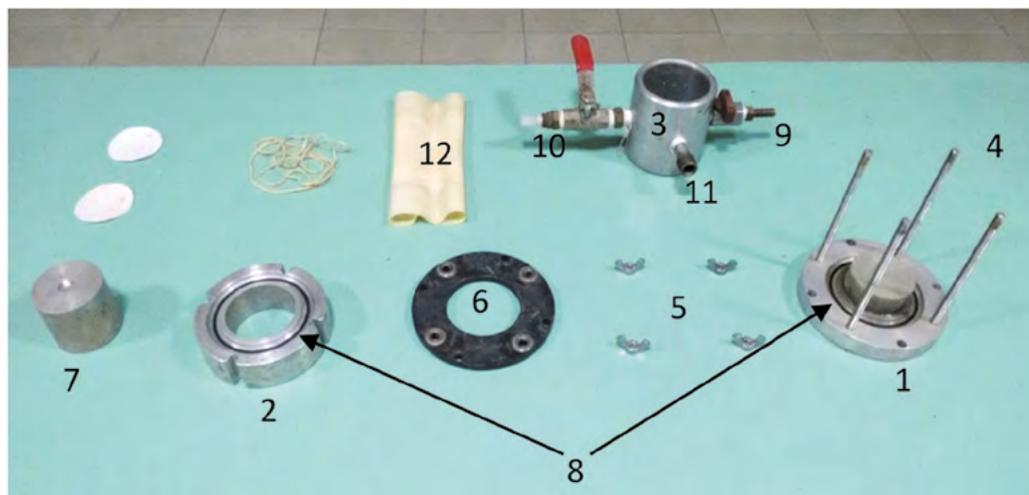


Fig. 1 – Célula K_0 – Corte esquemático



1. Base; 2. Colarinho; 3. Célula de confinamento da amostra; 4. Hastes rosqueadas; 5. Porcas borboletas; 6. Disco de tração; 7. Êmbolo; 8. Orings de vedação; 9. Válvulas de entrada; 10. Válvula de extração de ar; 11. Válvula de leitura; 12. Membrana em látex.

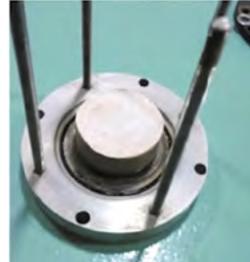
Fig. 2 – Célula K_0 – (a) Vista lateral e (b) superior

Foram testadas várias relações entre a altura e o diâmetro do corpo de prova, tendo como ideal a $L/D=1,0$. Uma dos condicionantes para obtenção dessa relação foi a certeza de que o corpo de prova estivesse totalmente em contato com a membrana na sua parte mais central, eliminando o efeito da fixação da membrana nos extremos superior e inferior da célula.

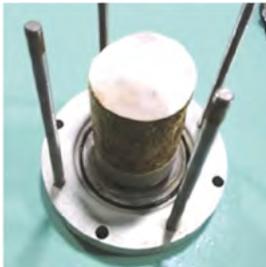
A carga vertical é aplicada através de pesos, similar ao ensaio de adensamento convencional. As medidas de deformação vertical é efetuada através de LVDT com escala de medição de 0 a 10mm e precisão de 0,001mm. A tensão horizontal é medida através de transdutores de pressão com escala de medição de 0 a 690 kPa e precisão de 0,1 kPa.



- a) Colocação de papel filtro nas bases da amostra.



- b) Preparação da base da célula com as hastes de tração.



- c) Colocação do corpo de prova na base da célula com papel filtro na extremidade superior da amostra.



- d) Aplicação de vácuo sobre a câmara de forma que a membrana se fixe nas paredes internas, garantindo a integridade da amostra.



- e) Colocação da base superior sobre a câmara vazada.



- f) Colocação do disco de tração e fechamento da célula



- g) Colocação do embolo no orifício.



- h) Concluída as etapas de montagem, a água deve ser introduzida no sistema juntamente com os sensores.

Fig. 3 – Etapas da montagem da célula.



Fig. 4 – Célula acondicionada na prensa. Início da aplicação do carregamento vertical

As principais etapas do ensaio são:

- Fixação de equipamentos de medição de tensões vertical e radial e deformação vertical;
- Aplicação de uma pressão mínima de 5 kPa, para garantir o contato completo da membrana com o corpo de prova;
- Aplicação de carregamentos em faixas de 40 kPa, com pesos, e após equalização, leitura de pressão horizontal e deslocamento vertical;
- Descarregamento na metade do número de etapas de carregamento.

4.2 – Resultados Obtidos

As Figuras 5 e 6 mostram um exemplo de um resultado típico obtido com a célula K_0 -UFBa.

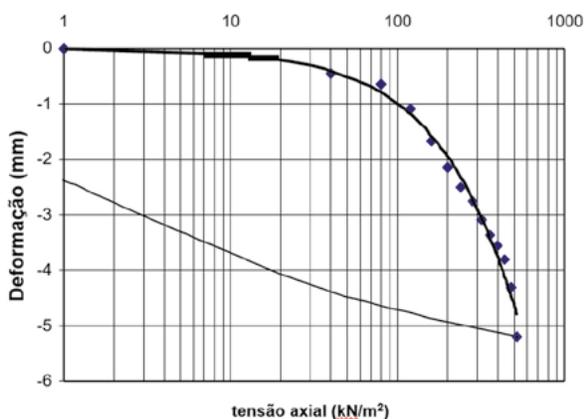


Fig. 5 – Gráfico Tensão X Deformação – Amostra 252 (Silva, 2010)

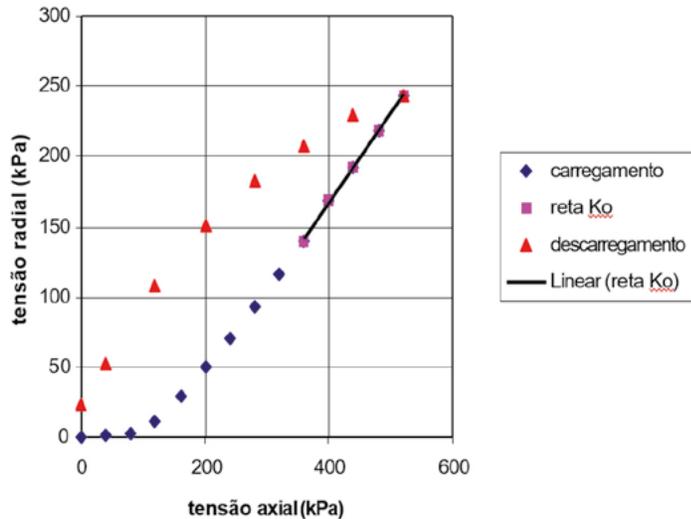


Fig. 6 – Gráfico Tensão Radial X Tensão Axial – Amostra 252 (Silva, 2010)

Como pode ser observado, as curvas apresentam características muito próximas aos ensaios observados por Brooker e Ireland (1965) e Abdelhamid e Krizek (1976) em equipamentos de laboratório sob condições de deformação confinada.

As tensões de sobreadensamento e índices de compressão (C_c) foram obtidas a partir da Figura 5.

A curva de carga, que representa a relação entre a tensão axial e a tensão radial, apresenta dois trechos (Figura 6). O primeiro trecho adquire forma hiperbólica, onde ocorrem os devidos ajustes iniciais da membrana e de partes do equipamento. Some-se a isso o retorno às tensões originais, após as mudanças no estado de tensões devido à amostragem.

O segundo trecho da curva de carga, após restaurar o estado das tensões originais, representa uma linha ascendente cuja inclinação é o valor de K_0 .

O Quadro 1 resume os resultados obtidos com a célula K_0 , onde pode ser observado:

- Os índices de correlação para a reta que representa o valor de K_0 esteve sempre acima do valor de 0,99, o que mostra uma excelente relação linear entre a tensão axial e a tensão radial.
- A razão de sobreadensamento (OCR) esteve abaixo do valor de 3,9, indicando um solo normalmente a levemente sobreadensado.

5 – RESULTADOS

O perfil de K_0 foi obtido através de ensaios laboratoriais com a célula K_0 e DMT, ao longo da profundidade. Para que os ensaios de campo pudessem ser analisados e comparados nas mesmas profundidades, foram adotados valores médios quando obtidos nos ensaios DMT correspondentes a cada metro.

Para o ensaio DMT o valor de K_0 foi obtido com base nas proposições de Marchetti (1980), Lunne et al. (1990) e Lacasse e Lunne (1988). Segundo Baldi et al (1986) o valor de K_0 pode ser obtido a partir da correlação entre os resultados do índice de tensão horizontal (K_d) obtidos no ensaio DMT (Marchetti, 1980).

Quadro 1 – Resultados obtidos com a célula K_0 -UFBa.

Amostra	Poço	Prof. (m)	Tensão sobre-adensamento (kPa)	Razão de sobreadensamento OCR	K_0	Índice de correlação (R^2)	Índice de Compressão (C_c)
141	talude	2,50	180	3,7	0,53	0,9974	0,0060
140	talude	4,34	**	**	0,50	0,9939	**
189	talude	4,52	275	3,2	0,40	0,9984	0,0067
139	talude	6,07	200	1,7	0,59	0,9966	0,0097
186	talude	8,60	255	1,5	0,48	0,9997	0,0054
260	talude	9,17	250	1,4	0,55	0,9960	0,0068
261	talude	9,88	245	1,3	0,58	0,9947	0,0073
138	talude	9,94	175	1,0	0,63	0,9991	0,0072
252	Poço 1	2,20	170	3,9	0,53	0,9994	0,0087
253	Poço 1	3,00	170	3,1	0,73	0,9914	0,0147
254	Poço 1	4,50	205	2,3	0,65	0,9993	0,0071
255	Poço 1	6,50	215	1,7	0,71	0,9974	0,0059
256	Poço 1	8,00	190	1,2	0,78	0,9987	0,0075
257	Poço 2	4,20	125	1,5	0,78	0,9994	0,0066
259A	Poço 2	7,00	165	1,2	0,67	0,9992	0,0091
259	Poço 2	7,50	155	1,1	0,67	0,9997	0,0082
258	Poço 2	8,50	205	1,2	0,53	0,9989	0,0095

** Ensaios não realizados

A Figura 7 mostra os resultados obtidos com a célula K_0 em função da profundidade em amostras indeformadas retiradas do talude acima do poço #1 e dentro dele, além dos valores obtidos através dos ensaios DMT03. O mesmo gráfico é mostrado na Figura 8, para o poço #2 e o ensaio DMT01.

Para a camada de solo próxima a cota 50m (Figura 7), houve uma maior dispersão de valores entre os ensaios DMT e Célula K_0 , devido à dificuldade de obtenção de amostras representativas, considerando a elevada presença de concreções.

Apesar da grande heterogeneidade e a dificuldade de obtenção de amostras completamente indeformadas representativas no caso do solo residual em estudo, somado as interferências feitas pela introdução do equipamento de medição (DMT), todas as propostas utilizando ensaios DMT apresentaram comportamentos semelhantes, quando comparados com os ensaios com a célula K_0 -UFBa.

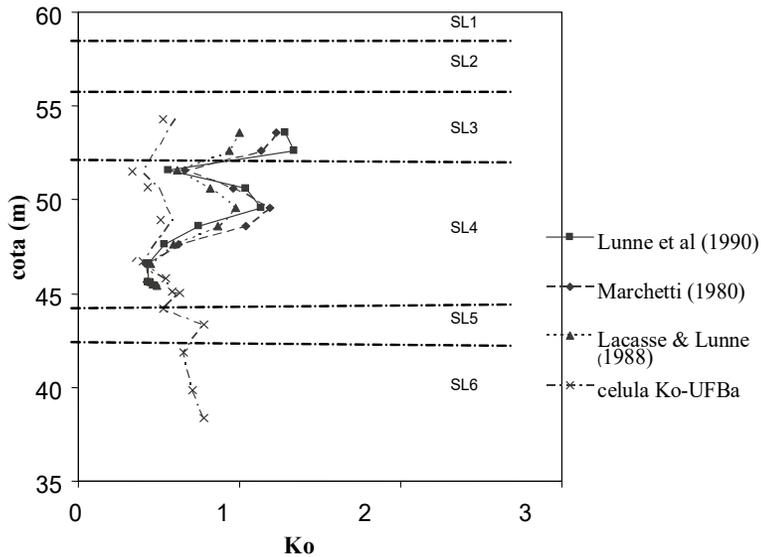
Na Figura 9 é apresentada a relação entre os parâmetros ϕ' e K_0 para diversos valores de OCR obtidos de amostras indeformadas coletadas no talude e no poço #1.

Os valores do ângulo de atrito efetivo (ϕ') foram obtidos em ensaios triaxiais consolidados não drenados (CU). Os valores de K_0 foram calculados através de valores obtidos da tensão de sobreadensamento na célula K_0 -UFBa.

A partir desse gráfico, foi obtida a equação seguinte, que retrata a relação entre ϕ' e K_0 para os solos residuais ensaiados, normalmente ou levemente sobreadensados ($OCR \leq 3,9$):

$$K_0 = 1,05 - \text{sen}(\phi') \quad (1)$$

Neste mesmo gráfico são apresentadas as equações propostas por Jaky (1944), para solos arenosos, e Brooker e Ireland (1965). Para as amostras com OCR próximo da unidade (normalmente adensadas), os valores observados estiveram bem próximos às proposições efetuadas pelos autores.



Legenda: SL1-aterro; SL2-silte Arenoso vermelho; SL3-silte argiloso; SL4-silte arenoso c/ pedregulhos (saprólito); SL5-silte arenoso c/ fragmentos de rocha alterada; SL6-RAD/RAM

Fig. 7 – Distribuição dos valores de K_0 em função da profundidade – DMT03 e Célula K_0 – Poço #1 (Silva e Assis, 2008)

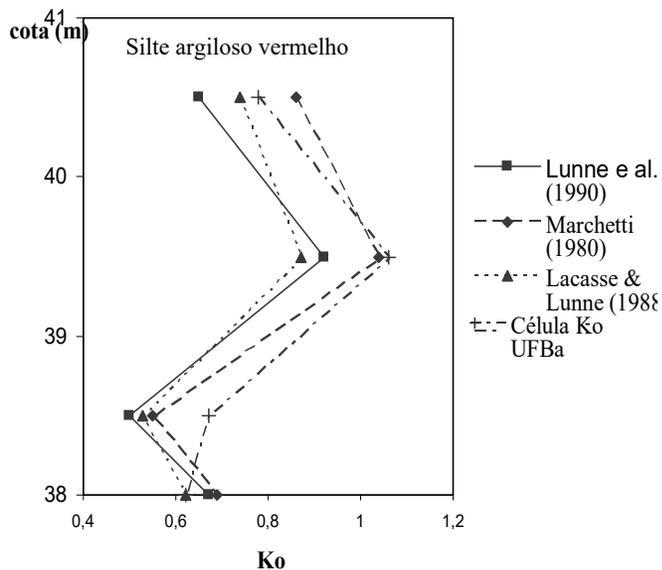


Fig. 8 – Distribuição dos valores de K_0 em função da profundidade – DMT01 e Célula K_0 – Poço #2 (Silva e Assis, 2008)

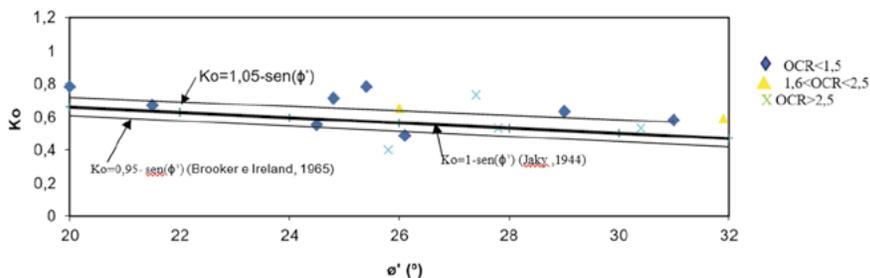


Fig. 9 – Relação entre os parâmetros ϕ' e K_0 para diversos valores de OCR

No entanto, valores de OCR maiores que 1,5 apresentaram grande dispersão na relação entre ϕ' e K_0 , demonstrando apenas uma leve tendência à redução de K_0 com a elevação do ângulo de atrito efetivo do solo. No entanto, ressalta-se que nenhuma das expressões indicadas para solos sobreadensados na literatura retrataram bem o comportamento dos solos residuais do granulito.

6 – CONCLUSÕES

Os resultados mostraram comportamento semelhante ao longo da profundidade em ambas as áreas de ensaio quando comparados com os resultados da célula K_0 -UFBa e ensaios de campo (DMT). A variação dos valores deve-se principalmente à heterogeneidade do solo residual, associada a fatores como erosão superficial, cimentação devido à presença de óxidos e histórico de tensões oriundas da rocha mãe.

Considerando os valores de K_0 em ensaios em amostras nominalmente ou levemente sobreadensadas ($OCR \leq 1,5$) a equação que relaciona o ângulo de atrito efetivo aos valores de K_0 esteve muito próxima às equações propostas por Jaky (1944), para solos arenosos e de Brooker e Ireland (1965).

Novos ensaios deverão ser realizados no solo residual do granulito, porém as perspectivas para o uso deste equipamento parecem promissoras.

7 – AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Universidade Federal da Bahia pelo apoio e financiamento com a célula K_0 -UFBa.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelhamid, M.S.; Krizek, R.J. (1976). *At-rest lateral earth pressure of a consolidating clay*. Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE 102(Gt 7), pp. 721-738.
- ASTM (1986). *Sub-Committee D18.02.10. Suggested Method for Performing the Flat Dilatometer Test*, In: Geotech. Testing, USA, 9 (2), pp. 93-18.
- Baldi, G.; Bellotti, R.; Ghionna, V.; Jamiolkowski, M.; Marchetti, S.; Pasqualini, E. (1986). *Flat Dilatometer Tests in Calibration Chambers*. Proc. In Situ '86 ASCE Spec. Conf. on "Use of In Situ Tests in Geotechn. Engineering". Virginia Tech, Blacksburg, VA, June 23-25. ASCE Geotechn. Special Publ. No. 6, 431p.
- Brooker, E.W.; Ireland, H.O. (1965). *Earth pressures at rest related to stress history*. Canadian Geotechnical Journal. 2(1), pp 1-15.

- CEN (2007). *EN 1997-2:2007 Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2- Ground investigation and testing*. CEN.
- Edil, T.B.; Dhowian, A.W. (1981). *At-rest lateral pressure of peat soils*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(Gt 2), pp. 201-217
- Ferreira, H.N. (1982). *Acerca do coeficiente de impulso em repouso*. Geotecnia, 35, pp 41-106.
- Fonseca, A.V. (1996). *Geomecânica dos Solos Residuais do Granito do Porto. Critérios Para Dimensionamento de Fundações Directas*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 245 p.
- Fonseca, A.V.; Sousa, J.A. (2002). *Coeficiente de impulso em repouso em solos saprolíticos*. Geotecnia, 95, pp. 33-48.
- Jaky, J. (1944). *The coefficient of earth pressure at rest*. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 1, pp. 355-358.
- Lacasse, S.; Lunne, T. (1988). *Calibration of dilatometer correlations*. 1st Int. Symp. on Penetration Testing, ISOPT-L, Orlando, pp. 539-548.
- Lunne, T.; Robertson, P.K.; Powell, J.J.M. (1990). *Cone Penetration Testing*. Geotechnical Practice, Blackie Academic e Professional, New York, USA, 312 p.
- Marchetti, S. (1980). *In situ tests by flat dilatometer*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 106(3), pp. 299-321.
- Marchetti, S.; Crapps, D.K. (1981). *Flat Dilatometer Manual*. Internal Report of GPE Inc., Gainesville, USA.
- Massarsch, K. R. (1979). *Lateral earth pressure in normally consolidated clays*. Proc. 7th ICSMFE, Brighton, England, 2, pp. 245-249.
- Poulos, H.G.; Davis, E.H. (1972). *Laboratory determination of in situ horizontal stress in soil masses*, Géotechnique, 22, pp. 177-182.
- Silva, J. C. B. J. da (2010). *Comportamento de Emboques de Túneis em Solos Residuais*. Tese de Doutoramento. G. TD-065/2010. 346 p. UnB. Brasília. DF.
- Silva, J.C.B.J.; Assis, A.P. (2008). *Influência de contenções atirantadas sobre o valor de Ko em emboques de túneis*. 2º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas / Seminário Internacional South American Tunneling, ABMS, São Paulo, SP, 1: 1-10.
- Sousa, J.F.V. (2002). *Modelação de Ensaios de Carga Considerando a Variação da Rigidez dos Solos em Profundidade: Parametrização Recorrente de Ensaios Complementares in Situ e em Laboratório*. Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 180 p.
- Vaughan, P.R.; Kwan, C.W. (1984). *Weathering, structure and in situ stress in residual soils*. Géotechnique 34(1), pp. 43-59.
- Wroth, C.P. (1975). *In situ measurement of initial stress and deformation characteristics*. Conf on in Situ Measurement of Soil Properties, North Carolina Univ /ASCE, Raleigh. N.C., USA, 1, pp. 181-230.