

# **A RESISTÊNCIA DA ESTRUTURA DE UM SOLO ARTIFICIAL DE MATRIZ CIMENTADA**

## ***STRUCTURAL STRENGTH OF AN ARTIFICIAL SOIL OF CEMENTED MATRIX***

MARQUES, SÓNIA H. M.\*  
LEMO, LUÍS J. L.\*\*

### **RESUMO**

Apresenta-se uma contribuição para a compreensão do comportamento geomecânico dos solos residuais graníticos, sendo descrita uma metodologia para constituição de amostras de um solo artificial de matriz cimentada por caulino, que procura modelar o seu comportamento estrutural. É efectuada a apresentação e discussão de alguns resultados dos ensaios de laboratório para caracterização mecânica, sendo definidas através de ensaios triaxiais envolventes de resistência para diversas trajectórias de tensões.

### **ABSTRACT**

A contribution to the understanding of the geomechanical behaviour of granitic residual soils is presented, being described a methodology for the constitution of samples of an artificial soil of cemented matrix by kaolin, that can model their structural behaviour. The presentation and discussion of some results of the laboratory tests for the mechanical characterisation are made, being defined strength envelopes to various stress paths by triaxial tests.

(\*) *Engenheira Civil, Assistente do 2.º triénio do DEC da ESTG-IPG*

(\*\*) *Engenheiro Civil, Professor Associado com agregação do DEC da FCTUC*

## 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os princípios da mecânica dos solos sedimentares foram estabelecidos a partir da investigação das propriedades de solos naturais remoldados ou reconstituídos, ou mesmo através da utilização de materiais artificiais, em que o índice de vazios inicial e a história de tensões, factores determinantes do comportamento dos mesmos, podem ser variados de um modo controlado no laboratório.

A realização de ensaios em materiais modelo tem-se também revelado vantajosa na compreensão do comportamento mecânico de diversos geomateriais não sedimentares. Vaughan [1] salientou a importância da preparação de amostras artificiais para a investigação do comportamento de solos residuais naturais, ultrapassando-se deste modo as dificuldades inerentes à amostragem e à variabilidade inata que caracteriza este tipo de materiais. Com a sua orientação, Maccarini [2] desenvolveu um material artificial para simular solos residuais, tendo sido apontadas diversas vantagens, entre as quais a possibilidade de formação de um modo controlado de uma vasta gama de densidades iniciais e de resistências de ligações interparticulares de cimentação, e de ensaiar o mesmo material num estado não cimentado, para estabelecimento de um modelo de comportamento de referência, em relação ao qual o efeito das ligações interparticulares de cimentação poderia ser considerado.

O principal objectivo de Maccarini [2] era desenvolver um modelo de comportamento para os solos residuais, em grande parte condicionado pela estrutura herdada da rocha mãe ou resultante dos efeitos da cristalização durante a alteração mineral e da precipitação de material de cimentação.

Foi desenvolvida inicialmente uma técnica de constituição de amostras através da formação de uma pasta por mistura de caulino e areia de quartzo num estado húmido. Após secagem e cozedura, o caulino actuava como agente de cimentação nos contactos interparticulares, resultando uma estrutura aberta e permeável, típica dos solos residuais. A resistência das ligações interparticulares podia ainda ser variada alterando a proporção de caulino e areia de quartzo, ou alterando a temperatura e tempo de cozedura.

Outras modificações foram progressivamente introduzidas. Para simular melhor um solo residual granítico, com partículas de dureza variável, parte da areia de quartzo foi substituída por uma areia constituída por pasta de caulino cozida, posteriormente esmagada num almofariz e peneirada, de modo a obter-se uma granulometria idêntica à da areia de quartzo. Esta areia, designada por cfk, pretendia simular partículas friáveis de feldspato alterado, presentes nos solos residuais graníticos em conjunto com partículas de maior dureza, como as de quartzo. A gama de índices de vazios iniciais que podia ser obtida através desta metodologia era limitada, e de modo a simular a porosidade variável típica dos solos residuais, foram ainda desenvolvidas duas técnicas adicionais:

- i. As amostras de baixa densidade foram obtidas adicionando à mistura original parafina com graduação idêntica à da areia de quartzo, que ao ser queimada durante a cozedura formava vazios adicionais;
- ii. As amostras de maior densidade foram obtidas por vibração controlada da amostra ainda num estado húmido.

Várias misturas foram utilizadas e designadas por códigos compostos por três números, que representam as percentagens parciais em peso seco dos principais constituintes sólidos: caulino, cfk e areia de quartzo. Os resultados de ensaios em misturas teste indicaram que a mistura designada por 13/30/57 era adequada para modelar o comportamento dos solos residuais naturais, com fracas ligações interparticulares. Foi estabelecida uma temperatura de cozedura mínima de 500°C, de modo a que o caulino por contracção providenciasse as requeridas ligações interparticulares, e um tempo de cozedura em geral de 5 horas. A utilização de temperaturas de cozedura superiores a 500°C e de outros tempos de cozedura permitiu variar a resistência das ligações interparticulares de cimentação.

Maccarini [2] demonstrou ainda que as amostras artificiais assim constituídas apresentavam um padrão consistente de comportamento, semelhante ao observado em solos residuais naturais, tendo indicado os principais factores que controlam o comportamento mecânico destes materiais: resistência das ligações interparticulares, porosidade, mineralogia e granulometria.

Este artigo apresenta algumas conclusões decorrentes de um projecto de investigação, em que a técnica de constituição de amostras artificiais descrita por Maccarini [2] e posteriormente considerada por outros investigadores (Bressani [3]; Toll *et al.* [4]; Malandraki *et al.* [5], [6] e [7]), foi também utilizada para produzir várias misturas, e deste modo apresentar uma contribuição para uma melhor compreensão do comportamento geomecânico dos solos residuais graníticos.

## **2. METODOLOGIA PARA CONSTITUIÇÃO DE AMOSTRAS DE UM SOLO ARTIFICIAL DE MATRIZ CIMENTADA POR CAULINO**

Os resultados dos ensaios de corte triaxial apresentados neste artigo são referentes ao material artificial tipo 13/30/57, cozido a 500°C durante 2 horas, tendo sido efectuada uma prévia caracterização dos seus principais constituintes sólidos (caulino/cfk/areia de quartzo).

O caulino, previamente seco numa estufa e depois reduzido a pó, apresentava uma densidade das partículas de 2,61 no estado não cozido. Foram realizados alguns ensaios para determinação dos limites de consistência do mesmo, como se indica nas Figuras 1 e 2. Constatou-se que a diferença entre os limites de liquidez determinados através dos procedimentos descritos na NP-143 [8] e na BS 1377: Part 2 [9] poderia ser superior a 10%, como mencionado por Queiroz de Carvalho em 1986 (Vaughan *et al.*, [10]). O limite de plasticidade obtido através dos procedimentos descritos na NP-143 [8] foi de 28%.

O cfk foi obtido através da formação de uma pasta por mistura de caulino com água destilada, previamente seca ao ar e depois cozida num forno durante 3 horas a 1000°C. Após arrefecimento, o caulino cozido era esmagado num almofariz e peneirado, de modo a obter-se uma granulometria idêntica à da areia de quartzo.

A areia de quartzo, previamente lavada e seca numa estufa, apresentava uma densidade das partículas de 2,65. As dimensões das suas partículas, de forma angular a subangular, foram limitadas entre 0,3 e 0,85 mm através de peneiração.

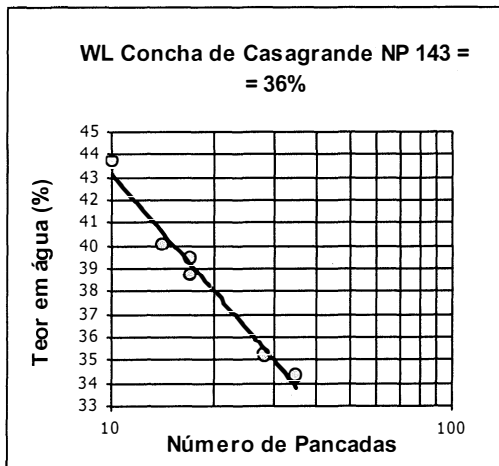


Figura 1 – Determinação do limite de liquidez do caulino (NP-143, [8])

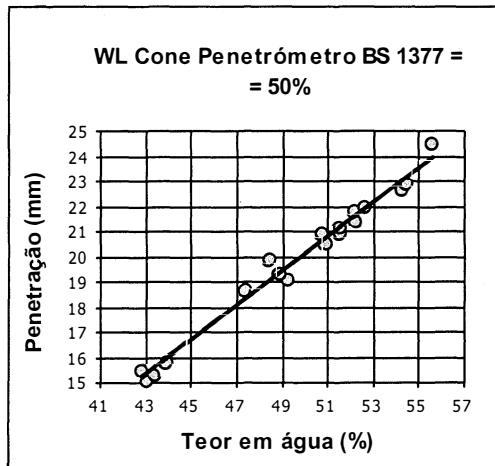


Figura 2 – Determinação do limite de liquidez do caulino (BS 1377: Part 2, [9])

As quantidades requeridas em peso dos diferentes constituintes sólidos eram colocadas numa taça, e após mistura, era adicionada progressivamente água destilada. A mistura líquida era então colocada com a ajuda de uma espátula num molde de papel de filtro, com uma geometria cilíndrica de dimensões próximas das requeridas para as amostras a ensaiar (38\*76 mm), que por sua vez envolvia um molde cilíndrico de alumínio, que era suavemente retirado à medida que se procedia ao enchimento. O procedimento era depois repetido para mais algumas amostras, sendo as mesmas posteriormente expostas ao ar para secar no laboratório. Após três dias era possível manusear as amostras e retirar com facilidade o envólucro de papel de filtro. As mesmas eram então colocadas num forno, sendo cozidas a uma temperatura de 500°C durante 2 horas. Após cozedura e arrefecimento, apresentavam dimensões próximas das pretendidas e eram suavemente aparadas até à dimensão final. As amostras assim obtidas eram facilmente desfeitas à mão, resultando um material de referência com a mesma composição, mas em que as ligações interparticulares devidas ao cimento haviam sido destruídas.

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CORTE TRIAXIAL

Procurou-se avaliar a influência da trajectória de tensões nas envolventes de resistência do material artificial constituído, através da realização de ensaios de compressão triaxial não drenados com  $\sigma_3$  constante, drenados com  $\sigma_3$  constante e drenados com  $p'$  constante. O respectivo material de referência no estado desestruturado foi também ensaiado sob as mesmas trajectórias de tensões. Foram realizados 41 ensaios de corte triaxial sobre amostras artificiais com dimensões de 38\*76 mm, no estado estruturado e desestruturado, tendo sido utilizada uma câmara triaxial de trajectória de tensões tipo Bishop-Wesley, com medição do deslocamento axial através de um LVDT externo. Os estágios de corte foram efectuados com tensão controlada, sendo a velocidade de aplicação da tensão distorcional  $q$  de 100 KPa por hora. Foi ainda efectuada a normalização dos resultados dos ensaios de corte triaxial, de modo a ter-se em

consideração as diferenças entre os índices de vazios iniciais e a compatibilização dos vários ensaios. Para o valor de  $v$  no estado corrente foi definido um parâmetro normalizador  $p'_e$ , que representa a tensão efectiva média equivalente obtida através da equação da linha de compressibilidade intrínseca, definida a partir de ensaios de consolidação unidimensional edométrica e posteriormente transposta para o espaço  $v$ - $p'$ . Foram utilizados dois critérios de rotura ( $q$  máximo e  $q/p'$  máximo, equivalente a  $\sigma'_1/\sigma'_3$  máximo), que representam os mesmos pontos de rotura em ensaios drenados. Os pontos de rotura assim determinados para os diversos ensaios realizados definem uma envolvente de resistência em geral curvilínea, tendo sido utilizada a equação de Mohr-Coulomb para parametrizar valores de coesão e de ângulo de resistência ao corte em intervalos de tensão relevantes.

Nas Figuras 3, 4 e 5 apresentam-se as trajectórias de tensões normalizadas referentes a cada agrupamento de ensaios realizados sobre o material artificial no estado estruturado, de acordo com a trajectória de tensões seguida.

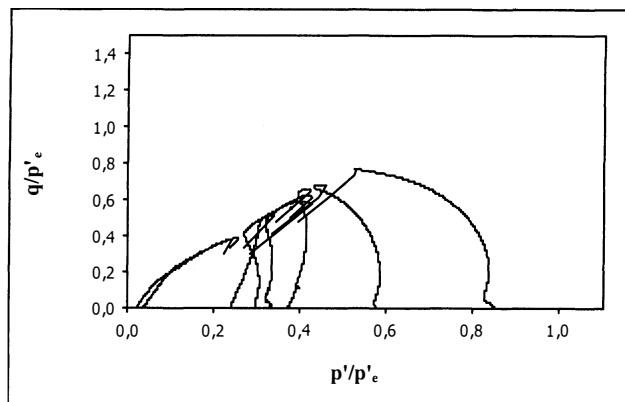


Figura 3 – Trajectórias de tensões normalizadas referentes aos ensaios não drenados de compressão com  $\sigma_3$  constante

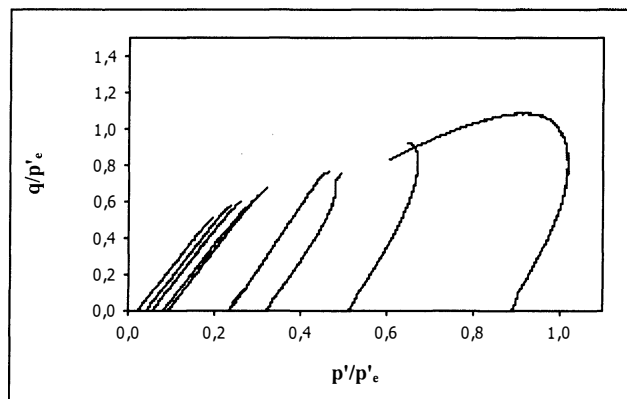


Figura 4 – Trajectórias de tensões normalizadas referentes aos ensaios drenados de compressão com  $\sigma'_3$  constante

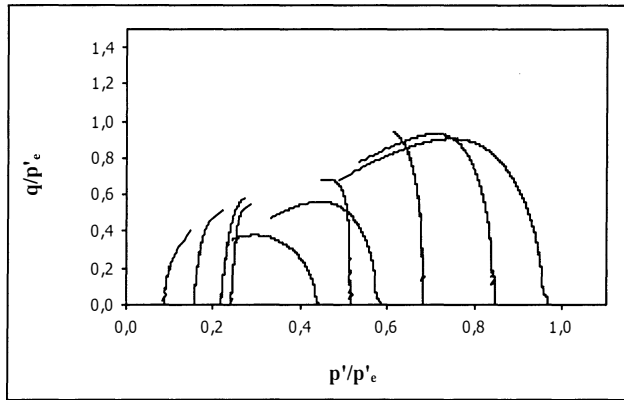


Figura 5 – Trajectórias de tensões normalizadas referentes aos ensaios drenados de compressão com  $p'$  constante

Podem constatar-se que a forma das trajectórias de tensões normalizadas se enquadra num padrão consistente dentro de cada agrupamento de ensaios, sendo função da trajectória de tensões, e ainda que as superfícies de estado limite variam em tamanho e forma de acordo com as diversas trajectórias de tensões, como evidenciado pela Figura 6, em que se integram conjuntamente as superfícies de estado limite individualizadas nas Figuras 3, 4 e 5. A superfície de estado limite de Roscoe definida a partir dos ensaios drenados parece também apresentar um pico, particularidade observada por Coop [11] e Lee *et al.* [12], e explicada como sendo resultante de variações volumétricas devido à deformação das partículas e ao seu rearranjo.

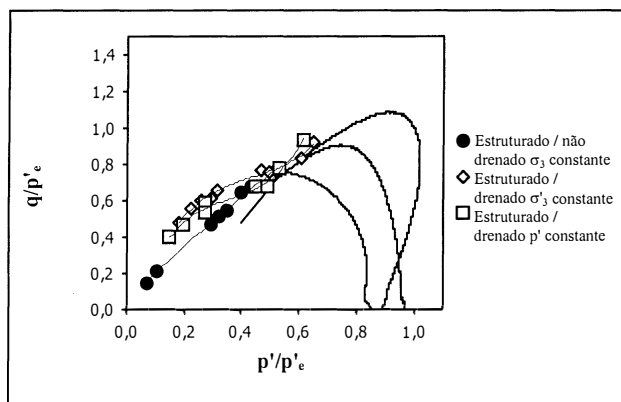


Figura 6 – Superfícies de estado limite completas para o material artificial no estado estruturado, segundo as diversas trajectórias de tensões

Na Figura 7 apresentam-se as envolventes de resistência integradas para as diversas trajectórias de tensões referentes ao material artificial no estado estruturado e desestruturado.

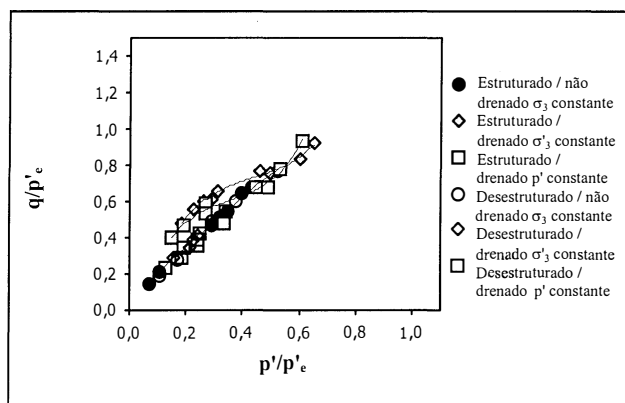


Figura 7 – Envoltórias de resistência integradas para as diversas trajetórias de tensões referentes ao material artificial no estado estruturado e desestruturado

Pode observar-se que as envoltórias de resistência para o material artificial no estado estruturado apresentam uma curvatura mais evidente, devido à degradação da estrutura durante os estágios de consolidação e de corte, sendo a sua posição condicionada pela trajetória de tensões. Em geral, o material artificial apresenta no início do estágio de corte uma estrutura tanto mais danificada pelo anterior estágio de consolidação, quanto maiores forem os valores das tensões de rotura normalizadas, não se atingindo no entanto dentro do intervalo de tensões em que os ensaios foram realizados a completa desestruturação em consolidação isotrópica triaxial. A trajetória de tensões drenada de compressão com  $\sigma'_3$  constante tende a convergir com as restantes para maiores valores das tensões de rotura normalizadas, iniciando uma maior preservação da estrutura em relação às restantes trajetórias de tensões. De facto, a maior tensão efectiva de consolidação isotrópica deste agrupamento de ensaios corresponde a 300 KPa, enquanto para os restantes grupos corresponde a 500 KPa. A posição dos pontos de rotura no espaço de tensões normalizado, correspondentes às mesmas tensões efectivas de consolidação isotrópica, depende da trajetória de tensões, o que se traduz em nítidas diferenças entre as três envoltórias de resistência, pois para um dado valor de  $p'/p'_e$  a estrutura não se encontra já nas mesmas condições para cada uma delas. A resposta anisotrópica observada é também resultante de diferenças impostas pelo estado de tensão incremental, tendo-se observado deformações volumétricas diferenciadas para os ensaios drenados segundo as diferentes trajetórias de tensões, o que poderá induzir diferente desestruturação em amostras em idênticas condições iniciais.

Por outro lado, não são evidentes diferenças significativas para as diversas trajetórias de tensões referentes ao material artificial no estado desestruturado. Verifica-se uma boa integração dos pontos de rotura referentes à confluência das linhas estruturadas e dos correspondentes ao material artificial no estado desestruturado, não sendo no entanto visíveis diferenças significativas em relação à envolvente de resistência definida para a trajetória de tensões não drenada de compressão com  $\sigma_3$  constante (apenas para valores de  $p'/p'_e$  inferiores a 0,10 são prováveis diferenças significativas, pois o material artificial no estado estruturado apresenta verdadeira coesão para tensões de confinamento nulas, em relação ao material

artificial no estado desestruturado, em que a mesma coesão é meramente aparente). Tal constatação pode dever-se à influência de uma primeira cedência que ocorre para baixas tensões efectivas de consolidação isotrópica ainda bastante longe da rotura.

No Quadro 1 apresenta-se a parametrização da resistência ao corte efectuada de acordo com os dois critérios de rotura considerados. Para as trajectórias de tensões drenadas referentes ao material artificial no estado estruturado apenas foram considerados os ensaios em que os efeitos da estrutura cimentada ainda conseguem tornar evidentes diferenças entre as envolventes de resistência no estado estruturado e desestruturado, tendo ainda sido agrupados todos os ensaios referentes ao material artificial no estado desestruturado.

Quadro 1 – Parametrização da resistência ao corte

Estado	Trajectória de tensões	Tipo de ensaio	Critério de rotura q máx			Critério de rotura $q/p'_{máx} < \sigma'_1 / \sigma'_{3máx}$		
			c' (KPa)	$\phi'$ (°)	R <sup>2</sup>	c' (KPa)	$\phi'$ (°)	R <sup>2</sup>
Estruturado	Compressão com $\sigma_3$ constante	CIU	5,92	35,05	0,9874	14,36	34,47	0,9947
Estruturado	Compressão com $\sigma'_3$ constante	CID	23,54	29,74	0,9727	23,54	29,74	0,9727
Estruturado	Compressão com p' constante	CID	17,73	31,17	0,9193	17,73	31,17	0,9193
Desestruturado	Compressão com $\sigma_3$ constante	CIU						
Desestruturado	Compressão com $\sigma'_3$ constante	CID	-	31,91	0,9627	-	37,11	0,9857
Desestruturado	Compressão com p' constante	CID						

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresenta alguns resultados de ensaios de corte triaxial realizados sobre amostras de um solo artificial de matriz cimentada por caulino, que pretende modelar o comportamento dos solos residuais graníticos naturais.

Foi descrita a metodologia de constituição das referidas amostras artificiais, que incluem partículas friáveis de cfk para simular melhor a mineralogia variável dos solos residuais



graníticos, em que estão presentes partículas de feldspato alterado em conjunto com partículas de maior dureza, como as de quartzo.

Procurou-se avaliar a influência da trajetória de tensões nas envolventes de resistência do material artificial constituído, e constatou-se que as mesmas apresentavam uma curvatura evidente devido à degradação da estrutura durante os estágios de consolidação e de corte, sendo a sua posição condicionada pela trajetória de tensões, o mesmo não se verificando para o material de referência no estado desestruturado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vaughan, P.R. (1985). "Mechanical and hydraulic properties of tropical lateritic and saprolitic soils, particularly as related to their structure and mineral components". Proc. of the 1<sup>st</sup> international conference on geomechanics in tropical lateritic and saprolitic soils, Brasilia, 1985. Vol.3, p.231-263.
- [2] Maccarini, M. (1987). "Laboratory studies of a weakly bonded artificial soil". London: Imperial College of Science and Technology, University of London. PhD dissertation.
- [3] Bressani, L.A. (1990). "Experimental properties of bonded soils". London: Imperial College of Science and Technology, University of London. PhD dissertation.
- [4] Toll, D.G.; Malandraki, V. (1993). "Triaxial testing of a weakly bonded soil". 'Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks': Proc. of an international symposium, Athens, 1993. Rotterdam: A.A.Balkema. Vol.1, p.817-823.
- [5] Malandraki, V.; Toll, D.G. (1994). "Yielding of a weakly bonded artificial soil". 'Pre-Failure Deformation of Geomaterials': Proc. of the 1<sup>st</sup> international conference on pre-failure deformation characteristics of geomaterials, Sapporo, 1994. Rotterdam: A.A.Balkema. Vol.1, p.315-320.
- [6] Malandraki, V.; Toll, D. (2000). "Drained probing triaxial test on a weakly bonded artificial soil". Géotechnique. Vol.50, N.º 2, p.141-151.
- [7] Malandraki, V.; Toll, D.G. (2001). "Triaxial tests on weakly bonded soil with changes in stress path". Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol.127, N.º 3, p.282-291.
- [8] NP-143 (1969). "Solos-Determinação dos limites de consistência". Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [9] BS 1377: Part 2 (1990). "British standard methods of test for soils for civil engineering purposes. Part 2: Classification tests". British Standards Institution.
- [10] Vaughan *et al.* (1988). "Indexing the engineering properties of residual soil". The Quarterly Journal of Engineering Geology. Vol.21, N.º 1, p.69-84.

- [11] Coop,M.R. (1990). "The mechanics of uncemented carbonate sands". Géotechnique. Vol.40, N.° 4, p.607-626.
- [12] Lee,I.K.; Coop,M.R. (1995). "The intrinsic behaviour of a decomposed granite soil". Géotechnique. Vol.45, N.° 1, p.117-130.