

# **CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE NATURAL DA RESISTÊNCIA AO CORTE DE UM SOLO RESIDUAL DE GRANITO DO PORTO**

## **CHARACTERIZATION OF THE SHEAR STRENGTH NATURAL VARIABILITY OF A GRANITE RESIDUAL SOIL FROM PORTO**

Pinheiro Branco, Luís; *AdFGeo – Consultores de Geotecnia, Lda., Porto, Portugal, luis.branco@adfconsultores.com*

Topa Gomes, António; *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, atgomes@fe.up.pt*

Silva Cardoso, António; *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, scardoso@fe.up.pt*

Santos Pereira, Carla; *Universidade Portucalense, Porto, Portugal, carlasantos@upt.pt*

### **RESUMO**

A renovação imposta pelos Eurocódigos nas metodologias de avaliação da segurança carece da análise estatística da variabilidade das propriedades geotécnicas dos maciços. Porém, os estudos publicados na literatura não contemplam os materiais que ocupam a maioria da superfície da região noroeste de Portugal – os solos residuais de granito – aos quais se encontra associada uma forte heterogeneidade. Assim, recorrendo a um número bastante significativo de ensaios experimentais, procedeu-se à caracterização estatística da variabilidade natural de um solo residual de granito do Porto, com especial incidência sobre as suas propriedades geomecânicas, tendo em vista a definição de uma base de projeto para a análise probabilística de problemas envolvendo este tipo de formações – modelação da variabilidade através da lei estatística teórica mais adequada e sua quantificação, por via do coeficiente de variação e da escala de flutuação.

### **ABSTRACT**

The renewal imposed by the Eurocodes regarding the methodologies of safety evaluation requires a statistical analysis of the variability of ground geotechnical parameters. However, the studies published in the literature do not cover the typical materials from the northeast region of Portugal – residual soils from granite – to which a strong heterogeneity is associated. Hence, a statistical characterization of the natural variability of a granite residual soil from Porto has been made through a significant amount of experimental tests, focusing on its geomechanical properties. In order to provide a database for probabilistic analysis of problems involving this type of soils, an appropriate statistical law has been used to model its variability and the coefficient of variation and the scale of fluctuation have been quantified.

### **1 - INTRODUÇÃO**

O conceito de segurança e as metodologias utilizadas para proceder à sua verificação têm experimentado uma evolução notável nos últimos anos. Contudo, nos projetos de estruturas geotécnicas em particular, continua a ser prática corrente basear todo o processo de dimensionamento num único fator de segurança global, o que é manifestamente insuficiente para abranger e, sobretudo, compreender a influência de todas as incertezas presentes no problema em apreço. Por conseguinte, e tendo em conta a própria linha de renovação imposta pelos Eurocódigos, estas metodologias clássicas tenderão a ser natural e gradualmente substituídas por abordagens mais racionais, de entre as quais se realçam as semiprobabilísticas – por exemplo, o método dos coeficientes parciais – e as probabilísticas, que assentam na teoria da fiabilidade.

A concretização dessa transição requer, por isso, que seja levada a cabo uma caracterização exaustiva e extensiva da variabilidade dos parâmetros geotécnicos que definem o comportamento dos maciços. Assim, para a tornar tão independente quanto possível de descrições qualitativas que acabam sempre por introduzir alguma subjetividade que se pretende mitigar, Kulhawy e Phoon (1999) sugerem uma análise estatística contemplando dois atributos quantitativos, a saber: o coeficiente de variação e a escala de flutuação. Apesar de a bibliografia consultada apresentar valores de referência para solos arenosos e argilosos, não foram encontrados estudos nos quais se quantifique de uma forma explícita a variabilidade dos solos residuais, cujas características singulares obrigam naturalmente a um tratamento individualizado.

Nesse sentido, Pinheiro Branco (2011) levou a cabo um número bastante significativo de ensaios de corte direto para caracterizar a variabilidade natural de um solo residual de granito do Porto, nomeadamente a sua resistência ao corte e ainda algumas propriedades físicas. Os resultados experimentais obtidos foram

tratados e analisados estatisticamente, tendo fundamentalmente em vista a determinação de valores para os coeficientes de variação e as escalas de flutuação de parâmetros de interesse, em relação aos quais são apresentadas algumas considerações críticas e as principais conclusões.

## 2 - A PROBLEMÁTICA DA VARIABILIDADE DOS SOLOS RESIDUAIS

### 2.1 - Incertezas em Geotecnia

O aspeto que talvez mais diferencie a Geotecnia dos restantes ramos da Engenharia Civil é o facto de lidar com materiais naturais, concretamente solos e rochas, cujas propriedades se encontram muito dependentes dos processos que lhe deram origem. Consequentemente, a caracterização geotécnica de um determinado local carece necessariamente da realização de inferências a partir de informação pontual obtida através da execução e posterior interpretação de ensaios, já que é impossível conhecer o valor dos parâmetros geotécnicos de interesse em cada um dos pontos que constituem o maciço. Na Figura 1, sistematiza-se o procedimento de estimação do valor de uma determinada propriedade de um maciço, assim como as incertezas que estão associadas a cada uma das etapas desse mesmo procedimento.

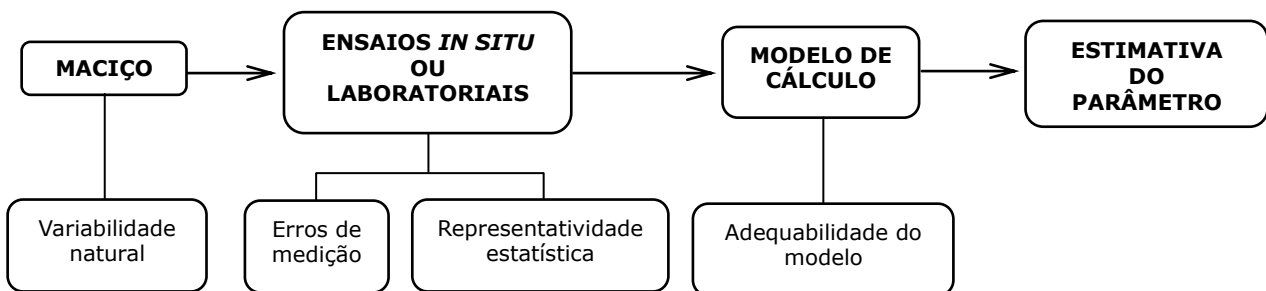


Figura 1 – Incertezas na estimativa dos parâmetros geotécnicos de cálculo (Kulhawy & Phoon, 1999, adaptado).

De entre todas as fontes de incerteza apresentadas, a variabilidade natural das propriedades dos maciços e a forma como estas últimas são avaliadas são as que contribuem mais significativamente para que a avaliação da segurança em Geotecnia seja particularmente problemática. Por isso, e atendendo ao facto de o presente trabalho incidir sobre a análise de um solo residual, restringe-se, por uma questão de coerência, a descrição das incertezas mencionadas ao material solo, em particular à variabilidade natural dos solos residuais.

### 2.2 - A Heterogeneidade dos Solos Residuais

Os solos residuais resultam de um processo de meteorização da rocha-mãe no qual ainda não houve lugar para a intervenção dos agentes erosivos de transporte. Trata-se de solos com distribuição granulométrica extensa que se caracterizam pelo facto de possuírem uma estrutura cimentada, na qual partículas graúdas (no caso de solos residuais de granito, minerais de quartzo) se encontram interligadas por pontes cimentícias remanescentes da estrutura da rocha que lhes deu origem e/ou resultantes da alteração de minerais quimicamente mais reativos, tais como os feldspatos (Viana da Fonseca et al., 1997).

Por conseguinte, em contraponto ao que sucede em depósitos sedimentares, nos quais se verifica uma constância assinalável das propriedades ao longo de um dado plano horizontal, os maciços de solos residuais não apresentam, em regra, estratificação horizontal, podendo ocorrer situações nas quais existe uma massa de solo residual envolvido por material rochoso ou outras nas quais surgem pontualmente blocos rochosos no seio de uma espessa camada de solo residual (Viana da Fonseca e Topa Gomes, 2010).

Assim, como as reações envolvidas na génese dos solos residuais estão dependentes de fatores que não são constantes no espaço, é necessário considerar não só a gama de valores que as suas propriedades podem assumir, mas também a respetiva variabilidade espacial, quer na direção vertical, quer na horizontal.

### 2.3 - Quantificação da Variabilidade Natural

#### 2.3.1 - Coeficiente de Variação e Escala de Flutuação

Kulhawy e Phoon (1999) sugerem a utilização de dois atributos quantitativos para analisar a variabilidade natural dos maciços, a saber: o coeficiente de variação e a escala de flutuação.

O coeficiente de variação é uma medida de dispersão relativa adimensional que, para uma dada amostra de dimensão  $n$ ,  $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , pode ser estimada para uma variável aleatória  $Y$  a partir da equação [1] (Curto e Pinto, 2009).

$$\widehat{cv}_y = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{\mu}_y)^2}{n-1}}}{\widehat{\mu}_y} \quad [1]$$

sendo  $\widehat{\mu}_y$  a estimativa da média da variável  $Y$  (isto é, a média aritmética dos  $n$  valores que constituem amostra de  $Y$ ).

No tocante à escala de flutuação, considere-se, a título exemplificativo, o talude não suportado de um maciço de solo residual representado na Figura 2 que se encontra na iminência de sofrer um deslizamento em bloco ao longo de uma diáclase-relíquia. Na mesma figura, encontra-se representada a variação do valor do ângulo de atrito,  $\emptyset$ , ao longo desse plano de baixa resistência remanescente da estrutura da rocha-mãe, assim como o respetivo valor médio.

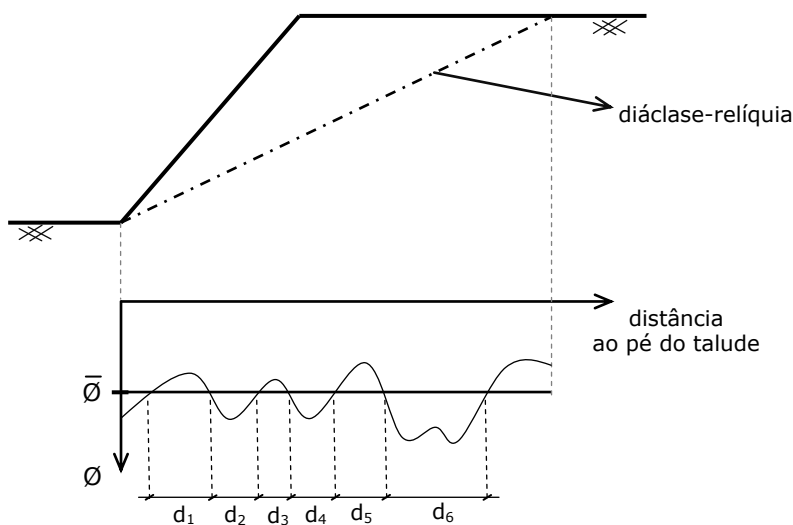


Figura 2 – Corte transversal de um talude de solo residual e representação gráfica da variação do ângulo de atrito ao longo da diáclase-relíquia existente.

Como se pode constatar na Figura 2, o valor que o ângulo de atrito assume ao longo da superfície de deslizamento não é constante. Então, para ter em consideração as oscilações espaciais relativamente ao valor médio, é oportuno introduzir o conceito de escala de flutuação,  $\delta$ . A escala de flutuação de uma dada propriedade é uma medida da distância dentro da qual os pontos do maciço apresentam valores da mesma ordem de grandeza, pelo menos relativamente à tendência traduzida pelo valor médio, o que indicia a existência de uma certa correlação entre as propriedades de pontos adjacentes (Wickremesinghe e Campanella, 1993). O seu valor pode ser determinado de forma aproximada através da equação [2] (Kulhawy & Phoon, 1999).

$$\delta \approx 0,8 \times \bar{d} \quad [2]$$

onde  $\bar{d}$  representa a média das distâncias entre pontos consecutivos de interseção da curva que define o valor real de uma dada propriedade com a reta correspondente ao seu valor médio.

Na prática, o valor da escala de flutuação é determinante na compreensão do comportamento de massas de solo potencialmente instáveis. De facto, os maciços terrosos comportam-se como estruturas altamente hiperestáticas; por conseguinte, se um dado carregamento conduzir a que zonas mais frágeis esgotem a sua capacidade resistente, ocorre uma redistribuição de tensões de corte para as zonas adjacentes que apresentam uma resistência mais elevada. Porém, para que este efeito de redistribuição possa ocorrer antes da rotura e o comportamento global do maciço possa ser governado pela sua resistência média, é necessário que a superfície na qual se mobiliza a resistência ao corte seja suficientemente extensa (Silva Cardoso e Matos Fernandes, 2001). Ou seja, o valor da escala de

flutuação é o valor de referência adotado para definir se a superfície de corte é ou não suficientemente extensa para que as tensões de corte possam efetivamente ser redistribuídas.

Para ter em conta essa capacidade de redistribuição de tensões na análise de maciços terrosos, Silva Cardoso e Matos Fernandes (2001) sugerem a consideração de um coeficiente de variação corrigido,  $CV_{real}$ , que tem em conta a relação entre a escala de flutuação e a extensão da superfície de corte – ver equação [3].

$$CV_{real} = CV \times \prod_{i=1}^n \left( \frac{\delta_i}{L_i} \right)^{1/2} \quad [3]$$

onde as dimensões da massa de solo potencialmente instável são definidas por  $L_i$ , e  $\delta_i$  são as escalas de flutuação correspondentes; note-se que o índice  $i$  se refere a uma dada direção espacial de entre as  $n$  consideradas na análise da variabilidade espacial da propriedade em análise.

### 2.3.2 - Parâmetros Estatísticos e Escalas de Flutuação Típicas em Solos

Numa perspetiva de enquadramento com os valores típicos que caracterizam a variabilidade natural dos solos, indicam-se no Quadro 1 alguns valores de referência para os coeficientes de variação associados a propriedades físicas e mecânicas de solos arenosos e argilosos.

Quadro 1 – Coeficientes de variação típicos em solos sedimentares.

Propriedade	Tipo de solo	cv (%)	Referência
Peso volúmico	Areias e argilas	3 a 7	(Duncan, 2000)
Ângulo de atrito efetivo	Areias	3 a 12	(Duncan, 2000)
		5 a 15	(Baecher e Christian, 2003)
	Argilas	12 a 56	(Baecher e Christian, 2003)
Coesão efetiva	Areias e argilas	10 a 70	(Shahin e Cheung, 2011)
		20 a 40	(Forrest e Orr, 2010)
Índice de vazios	Areias e argilas	7 a 42	(Baecher e Christian, 2003, adaptado)

No que diz respeito à componente espacial da variabilidade, os parâmetros que se encontram caracterizados na bibliografia consultada em termos de escala de flutuação são essencialmente os que podem ser avaliados a partir dos ensaios *in situ* que permitem obter um registo contínuo de valores. Assim, no Quadro 2, apresentam-se os valores documentados para a resistência não drenada determinada a partir do ensaio de corte rotativo e para a resistência de ponta do ensaio CPT, verificando-se que as escalas de flutuação horizontais tendem a assumir valores que são cerca de uma ordem de grandeza superiores às escalas de flutuação verticais correspondentes.

Quadro 2 – Escalas de flutuação típicas em solos sedimentares (Kulhawy e Phoon, 1999, adaptado).

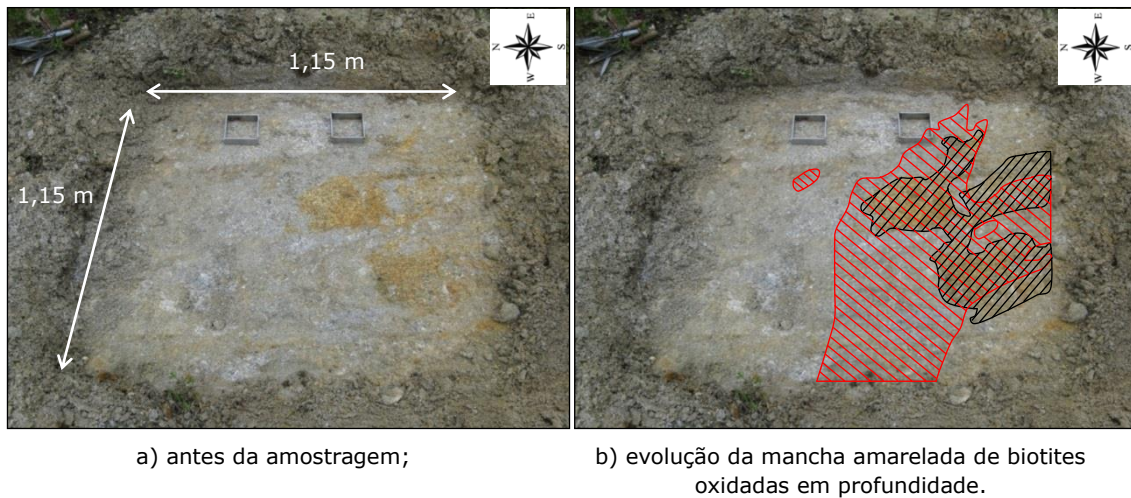
Propriedade	Tipo de solo	Direção	$\delta$ (m)
Resistência não drenada	Argilas	Vertical	0,8 a 6,2
		Horizontal	46,0 a 60,0
Resistência de ponta (CPT)	Areias e argilas	Vertical	0,1 a 2,2
		Horizontal	3,0 a 80,0

Quanto à modelação da variabilidade da maioria dos parâmetros geotécnicos, a distribuição normal é, em regra, a mais usual. Contudo, o facto de a distribuição normal admitir valores negativos constitui um entrave à modelação da variabilidade de parâmetros que assumem valores próximos de zero e aos quais se encontra associada uma grande dispersão, como sucede, por exemplo, com a coesão efetiva. Por conseguinte, para este parâmetro, Forrest e Orr (2010) sugerem a utilização de uma distribuição lognormal, já que só admite valores não negativos e atribui um peso maior aos valores mais baixos.

## 3 - VARIABILIDADE NATURAL DE UM SOLO RESIDUAL DE GRANITO DO PORTO

Amostras de um solo residual de granito do Porto foram recolhidas na freguesia de Paranhos, concelho do Porto – coordenadas geográficas aproximadas no UTM Datum WGS84: 41,17330° (latitude) e -8,60195° (longitude). Do ponto de vista geológico, trata-se de saibros graníticos, com um grau de alteração W5, que apresentam um aspeto manchado, diferenciando-se um saibro com feldspatos totalmente argilizados, com cor esbranquiçada, de outro claramente mais arenoso, com biotites oxidadas e cor amarelada (ver

Figura 3), tendo-se verificado que esta diferenciação tem um desenvolvimento errático não só em planta, mas também em profundidade.



**Legenda:**

- mancha amarelada de biotites oxidadas, antes da amostragem
- mancha amarelada de biotites oxidadas, após a amostragem

Figura 3 – Área analisada:

A variabilidade natural da resistência ao corte da área de aproximadamente 1,15x1,15 m<sup>2</sup> definida na Figura 3 foi caracterizada a partir de 40 ensaios de corte direto clássico. As amostras foram agrupadas em 10 conjuntos de 4, conforme se esquematiza na Figura 4, para os quais se avaliou a resistência de pico e a resistência residual em condições drenadas e saturadas a partir de ensaios conduzidos sob uma tensão normal de 25, 50, 75 e 100 kPa.

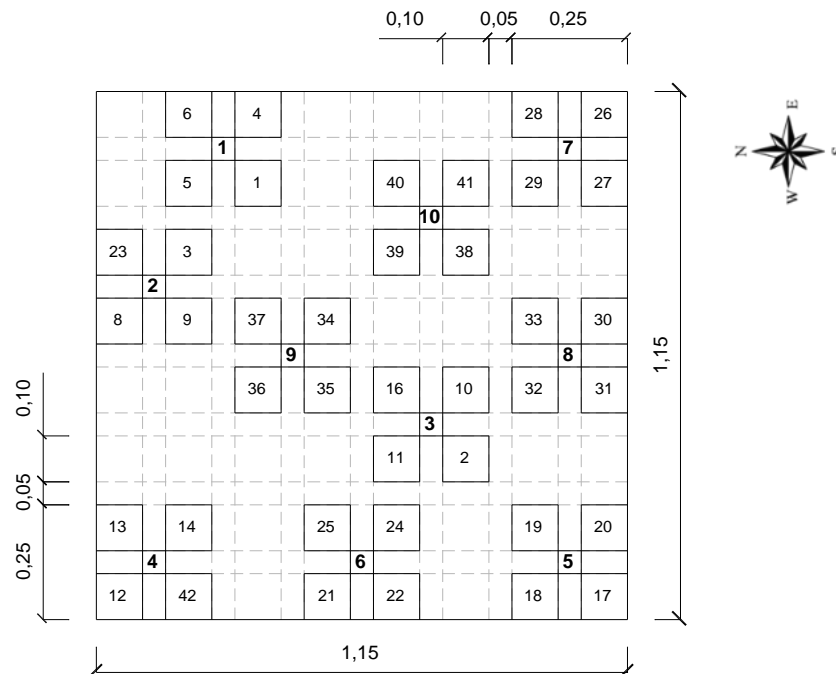


Figura 4 – Esquema da área analisada com a identificação dos 10 conjuntos de 4 amostras.

Apesar de o ensaio de corte direto clássico apresentar limitações, é importante realçar que se pretende quantificar a variabilidade natural do material e não a variabilidade induzida pelo ensaio a partir do qual as suas propriedades são determinadas. Logo, se todas as amostras forem sujeitas ao mesmo procedimento experimental e os resultados obtidos forem tratados da mesma forma, é essencialmente a variabilidade natural do solo que justifica a diferença entre as estimativas efetuadas, já que os erros da metodologia são sistemáticos.

### 3.1 - Variabilidade Natural do Esqueleto Sólido

Durante a preparação dos provetes para os ensaios de corte direto, foram determinados os valores de 2 grandezas que caracterizam o seu estado físico *in situ* – o peso volúmico natural e o teor em água natural. Contudo, a quantificação da variabilidade natural do esqueleto sólido de solos residuais tem que ser feita a partir de grandezas independentes do teor em água, tais como o peso volúmico seco e o índice de vazios, pelo que se procedeu à sua determinação e posterior análise estatística (ver Quadro 3, no qual também se encontra o peso volúmico saturado).

Quadro 3 – Parâmetros estatísticos relativos ao peso volúmico seco, saturado e índice de vazios.

Propriedade	Nº Amostras	$\hat{\mu}$	$\hat{c}_v$ (%)	Mínimo	Máximo
Peso volúmico seco	42	16,4 kN/m <sup>3</sup>	3,5	15,1 kN/m <sup>3</sup>	17,8 kN/m <sup>3</sup>
Índice de vazios	42	0,58	9,6	0,45	0,72
Peso volúmico saturado	42	20,0 kN/m <sup>3</sup>	1,8	19,1 kN/m <sup>3</sup>	20,8 kN/m <sup>3</sup>

Note-se que os valores do coeficiente de variação do peso volúmico seco e do índice de vazios se encontram perfeitamente balizados pelos limites apresentados no Quadro 1 para areias e argilas. Talvez fosse expectável que estes coeficientes de variação assumissem um valor mais elevado em solos residuais, uma vez que os solos sedimentares são tipicamente mais uniformes. Todavia, é importante salientar que, no caso do índice de vazios, as flutuações do teor em água induzem alterações substanciais em solos argilosos, o que não sucede no caso dos solos residuais, cuja fábrica apresenta uma rigidez tal que torna o índice de vazios praticamente independente do teor em água.

No que à modelação da variabilidade concerne, a aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov revelou que a distribuição normal se adequa razoavelmente ao conjunto de 42 observações de cada uma das 3 propriedades físicas estudadas, porque a probabilidade de obter valores calculados a partir desta amostra estatística de dados iguais ou ainda mais extremos do que aqueles que se obtêm assumindo a hipótese de as variáveis serem, neste caso em concreto, normalmente distribuídas, designada por *p-value*, é superior ao nível de significância,  $\alpha$ , geralmente adotado, 5% (Weber et al., 2006), conforme se mostra no Quadro 4.

Quadro 4 – Leis estatísticas adequadas para modelar a variabilidade das propriedades físicas.

Propriedade	Distribuição	<i>p-value</i> (%)	$\alpha$ (%)	Teste de Kolmogorov-Smirnov
Peso volúmico seco	Normal	53	5	Hipótese não rejeitada
Índice de vazios	Normal	25	5	Hipótese não rejeitada
Peso volúmico saturado	Normal	84	5	Hipótese não rejeitada

### 3.2 - Variabilidade Natural da Resistência ao Corte

A caracterização da resistência ao corte do solo para a gama de tensões de confinamento analisada, 25 a 100 kPa, foi efetuada por conjuntos de 4 amostras adjacentes (conforme ilustrado na Figura 4), assumindo, portanto, que a uniformização do comportamento do solo dentro de cada uma dessas áreas não mascara a existência de possíveis heterogeneidades localizadas. Para cada conjunto, a resistência de pico e a resistência residual foram estimadas através do critério de rotura de Mohr-Coulomb. Note-se que o valor máximo adotado para a tensão de confinamento sob a qual os ensaios de corte foram realizados, 100 kPa, teve em conta o valor máximo de tensão total vertical que o solo deverá ter experimentado *in situ*, garantindo-se, assim, que a integridade do esqueleto sólido dos provetes não foi comprometida durante a fase de consolidação dos ensaios.

Todos os ensaios de corte foram levados a cabo em condições drenadas, com saturação prévia dos provetes, obtendo-se, portanto, resistências efetivas – mas para evitar repetições, o termo “efetivo(a)” é, de ora em diante, omitido. Em cada ensaio, procedeu-se ao registo da resistência de pico e da resistência residual exibida pelo provete para a tensão de confinamento sob a qual o ensaio de corte direto foi conduzido. Posteriormente, aplicando o Método dos Mínimos Quadrados aos pontos representativos do estado de tensão na rotura, foram definidas as envolventes de rotura correspondentes à resistência de pico e à resistência residual para todos os conjuntos de 4 amostras – ver Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros estatísticos relativos às resistências de pico e residual.

Propriedade	Nº Conjuntos	$\hat{\mu}$	$\hat{c}_v$ (%)	Mínimo	Máximo
Ângulo de atrito de pico	10	40,3°	7,9	36,3°	45,6°
Coesão	10	9,3 kPa	68,0	0,2 kPa	18,9 kPa
Ângulo de atrito residual	10	37,5°	3,4	35,3°	39,4°

Em primeiro lugar, salienta-se que o valor da estimativa do coeficiente de variação do ângulo de atrito de pico deste solo residual de granito do Porto é bastante aceitável quando comparado com os valores de referência apresentados na literatura para solos granulares (ver Quadro 1). Em contrapartida, a coesão apresenta uma dispersão de resultados muito importante, com um coeficiente de variação muito próximo do valor máximo indicado por Shahin e Cheung (2011) para areias e argilas – 70%. Assim, e tendo em conta que a variabilidade da resistência residual é bastante reduzida, é lícito inferir que é a variabilidade da estrutura cimentada dos solos residuais que contribui mais significativamente para as incertezas associadas às suas propriedades resistentes.

Relativamente às leis estatísticas que melhor se ajustam à distribuição dos resultados obtidos para a resistência de pico e para a resistência residual do solo analisado, a hipótese de normalidade não é rejeitada pelo Teste de Kolmogorov-Smirnov, conforme se pode constatar a partir do Quadro 6.

Quadro 6 – Leis estatísticas adequadas para modelar a variabilidade dos ângulos de atrito de pico e residual.

Propriedade	Distribuição	p-value (%)	$\alpha$ (%)	Teste de Kolmogorov-Smirnov
Ângulo de atrito de pico	Normal	93	5	Hipótese não rejeitada
Ângulo de atrito residual	Normal	88	5	Hipótese não rejeitada

Já o conjunto dos 10 resultados obtidos para a coesão apresenta uma distribuição estatística que dificulta a modelação da respetiva variabilidade, conforme se encontra ilustrado na Figura 5.

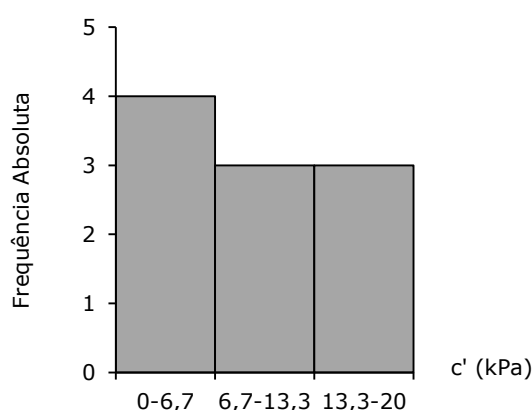


Figura 5 – Histograma relativo à coesão dos 10 conjuntos de amostras.

De facto, a distribuição lognormal sugerida por Forrest e Orr (2010) não se adequa à distribuição dos resultados obtidos, uma vez que, entre outros, não admite a possibilidade de a coesão ser nula. Para resolver o problema exposto, considerou-se um cenário hipotético no qual teriam sido apenas realizados 4 ensaios de corte direto. Assim, e tendo em conta que se dispõe de resultados relativos a 40 ensaios, 10 para cada tensão de confinamento, é possível proceder a  $10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10\,000$  agrupamentos aleatórios de 4 amostras, aos quais se encontra associada a distribuição de resultados representada na Figura 6.

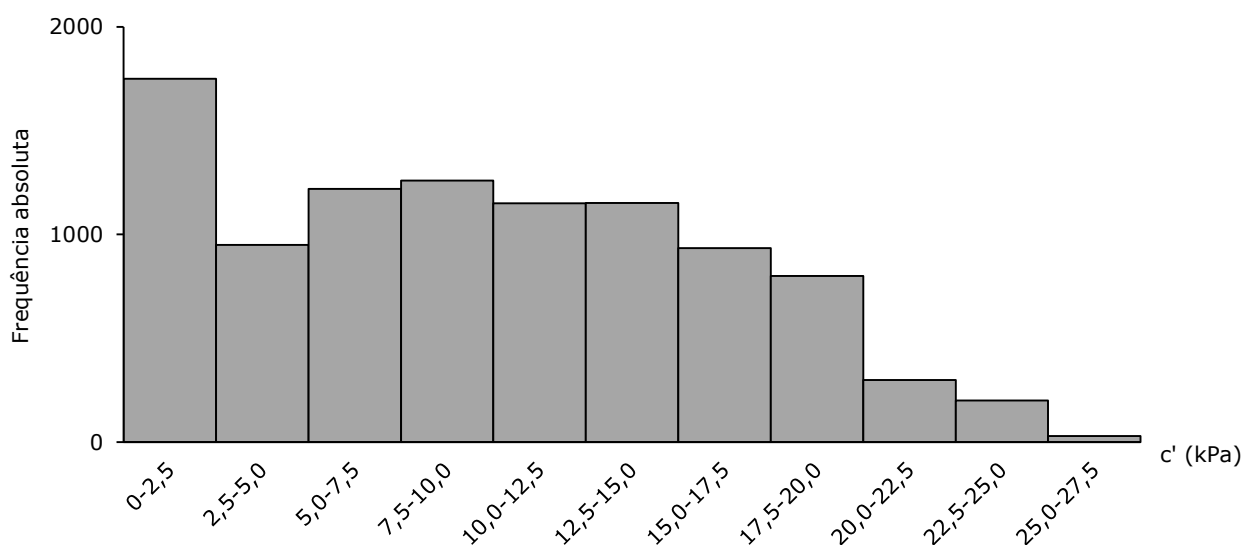


Figura 6 – Histograma relativo à coesão com agrupamentos aleatórios de amostras.

O histograma representado na Figura 6 mostra uma tendência de diminuição da probabilidade de ocorrência à medida que se consideram valores da coesão sucessivamente mais elevados. Além disso, a barra com valores inferiores a 2,5 kPa apresenta a frequência absoluta mais elevada, incluindo 916 coesões nulas, ou seja, cerca de 10% dos valores obtidos por este processo são nulos. Portanto, parece mais razoável, e prudente do ponto de vista do dimensionamento de estruturas geotécnicas envolvendo este tipo de solos, considerar uma distribuição exponencial para modelar a variabilidade da coesão.

### 3.2.1 - Escala de Flutuação da Resistência de Pico

Quando a resistência ao corte de um geomaterial é definida a partir do critério de rotura de Mohr-Coulomb, o ângulo de atrito de pico e a coesão não podem ser dissociados, uma vez que o seu comportamento geomecânico resulta da combinação dos dois parâmetros. Efetivamente, o ângulo de atrito de pico e a coesão encontram-se correlacionados e, no caso particular do solo em apreço, existe uma correlação negativa forte entre as duas variáveis, definida por um coeficiente de correlação,  $R$ , de aproximadamente -0.9 (ver Figura 7).

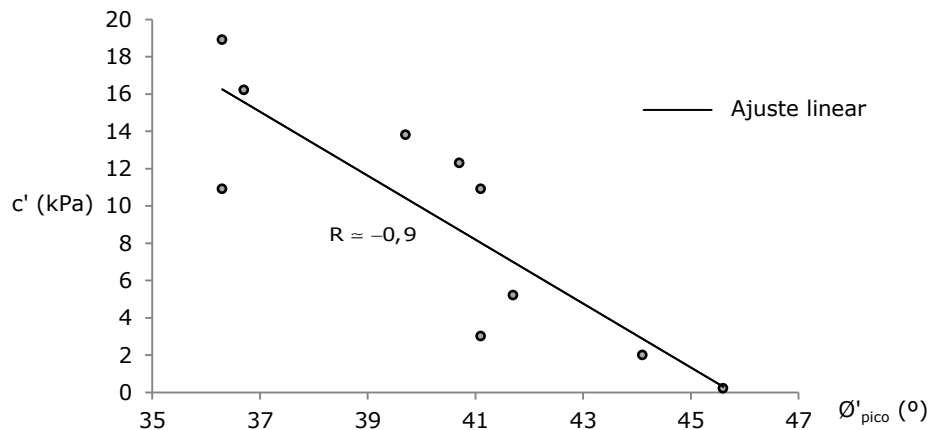


Figura 7 – Correlação entre o ângulo de atrito de pico e a coesão.

Por conseguinte, a comparação entre a resistência ao corte exibida por cada conjunto de 4 amostras deste solo residual de granito do Porto deve ser feita recorrendo a outra grandeza mais adequada para o efeito, como por exemplo o ângulo de atrito secante sugerido por Bolton (1986) para areias.

O ângulo de atrito secante pode ser interpretado como uma normalização da resistência ao corte, uma vez que, por definição, é o ângulo associado à razão entre a resistência ao corte e a tensão de confinamento correspondente. Então, tendo em conta que os ensaios de corte direto foram conduzidos sob 4 tensões de confinamento distintas para cada conjunto de amostras, a média aritmética dos 4 valores do ângulo de atrito secante de pico é um bom indicador da resistência de pico "média" de cada conjunto para a gama de tensões de confinamento testada. Na Figura 8, encontra-se representado o mapa da variabilidade espacial do ângulo de atrito secante de pico.

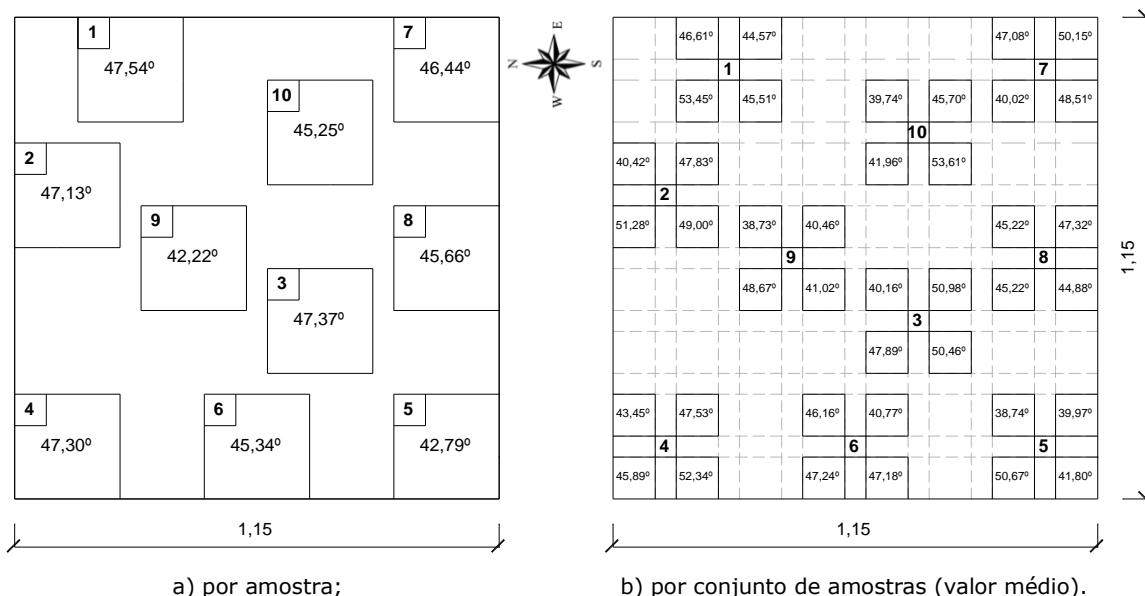


Figura 8 – Mapas de variabilidade espacial do ângulo de atrito secante de pico:

A Figura 8-b mostra que o valor médio do ângulo de atrito secante de pico e, por inerência, a resistência de pico “média” não apresentam uma dispersão de resultados tão grande quanto aquela que a distribuição de resultados associados à coesão poderia levar a crer, verificando-se flutuações espaciais pouco significativas de carácter aleatório.

Assim, para quantificar a componente espacial da variabilidade da resistência de pico “média”, procedeu-se à determinação do valor da escala de flutuação horizontal do valor médio dos ângulos de atrito secantes de pico afetos a cada um dos conjuntos de amostras, através da metodologia expedita que se passa a explicar.

Primeiro, procedeu-se ao agrupamento aleatório dos 10 conjuntos de amostras analisados. Seguidamente, esses conjuntos, que caracterizam uma área de  $0,25 \times 0,25 \text{ m}^2$ , foram unidos por linhas contendo os respetivos centros geométricos. Assim, a variabilidade espacial da resistência de pico “média” no interior da área de  $1,15 \times 1,15 \text{ m}^2$  pode ser avaliada analisando as flutuações espaciais do valor médio do ângulo de atrito secante de pico ao longo dessas linhas.

Há ainda a referir que a quantificação da escala de flutuação horizontal da resistência de pico “média” carece da definição de um valor representativo da resistência de pico da totalidade da área analisada. Como, a menos que existam heterogeneidades pontuais, a resistência ao corte exibida por massas de um dado solo localizadas à mesma profundidade e, por conseguinte, sujeitas às mesmas condições de confinamento deveriam ser da mesma ordem de grandeza, afigura-se legítimo considerar que a média aritmética dos 10 valores médios do ângulo de atrito secante de pico constitui um valor de referência apropriado.

Então, considerando três agrupamentos aleatórios distintos dos conjuntos de amostras identificados na Figura 8 (7-10-9-3-5, 1-2-9-3-5 e 1-10-8-3-6-4 – note-se que poderiam ter sido considerados outros agrupamentos, mas os resultados finais não seriam muito distintos), é possível estimar os valores da escala de flutuação horizontal das respetivas resistências de pico “médias” utilizando a equação [2], obtendo-se, respetivamente, os valores de 0,37, 0,29 e 0,42 m. A título exemplificativo, na Figura 9, mostra-se uma representação gráfica que traduz as flutuações espaciais em relação ao valor de referência da resistência de pico “média” ao longo do percurso definido pela união sequencial dos seguintes conjuntos de amostras: 1, 10, 8, 3, 6 e 4.

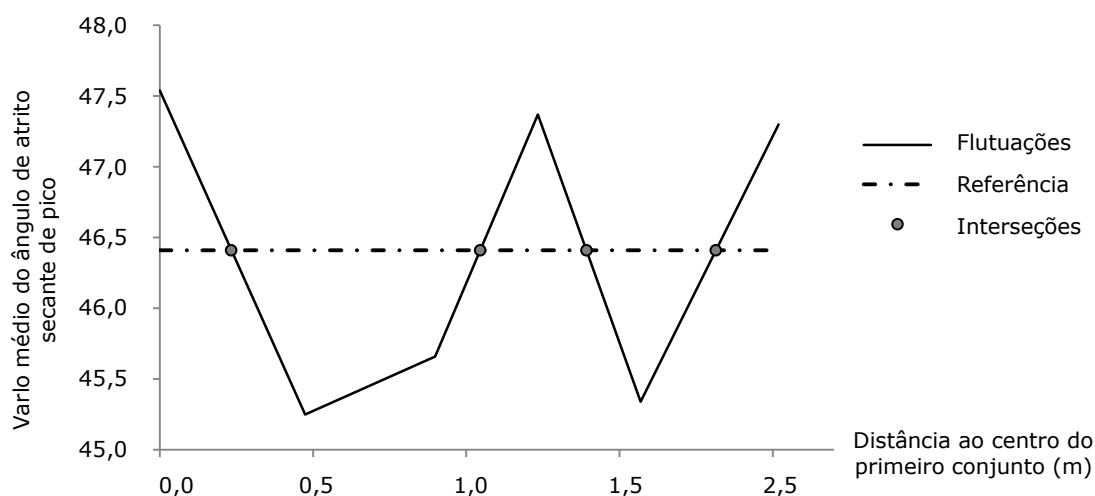


Figura 9 – Flutuações em relação ao valor de referência do valor médio do ângulo de atrito secante de pico ao longo das linhas que unem os seguintes conjuntos de amostras: 1, 10, 8, 3, 6 e 4.

Consequentemente, parece razoável afirmar que um valor indicativo para a escala de flutuação da resistência de pico “média” deste solo residual de granito do Porto é 0,42 m – por prudência, uma vez que se trata do valor mais elevado de entre os 3 apresentados – sendo de notar que se trata de um valor bastante mais pequeno do que os valores apresentados na bibliografia para as escalas de flutuação horizontais associadas a propriedades geomecânicas de areias e argilas (ver Quadro 2). Este valor reduzido pode, de alguma forma, estar associado ao facto de a área analisada ser também reduzida, pelo que é importante, em desenvolvimentos futuros, alargar a extensão estudada.

### 3.2.2 - Escala de Flutuação da Resistência Residual

Adotando o mesmo procedimento para o valor médio do ângulo de atrito secante residual, os valores da escala de flutuação horizontal que se obtêm para os mesmos 3 agrupamentos de conjuntos de amostras considerados anteriormente para a resistência de pico são, respetivamente, os seguintes: 0,40, 0,52 e

0,33 m. Por coerência com o apontado no parágrafo anterior, afigura-se lícito adotar o valor de 0,52 m como valor indicativo para a escala de flutuação da resistência residual “média”.

### 3.2.3 - Influência da Escala de Flutuação no Coeficiente de Variação

Conforme referido no subcapítulo 2.3.1, se a escala de flutuação for pequena quando comparada com a extensão da superfície de corte, a resistência da massa de solo potencialmente instável tende a ser governada pelo respetivo valor médio. Assim, no contexto de análises probabilísticas ou semiprobabilísticas de estruturas geotécnicas envolvendo este tipo de solos, é possível tomar partido da capacidade de redistribuição de tensões de corte que os mesmos exibem para superfícies de rotura de grandes dimensões. Ou seja, de acordo com a equação [3], os coeficientes de variação associados aos parâmetros que definem a resistência de pico e a resistência residual do solo em apreço – ângulo de atrito de pico e coesão, e ângulo de atrito residual – devem ser afetados de um fator que tem em conta a relação entre a escala de flutuação e a extensão da superfície de rotura (ver Figura 10 e Figura 11). Note-se que, por simplificação, se assumiu que a escala de flutuação vertical destes parâmetros geomecânicos é igual à escala de flutuação horizontal correspondente – hipótese que se afigura apropriada para este tipo de solos.

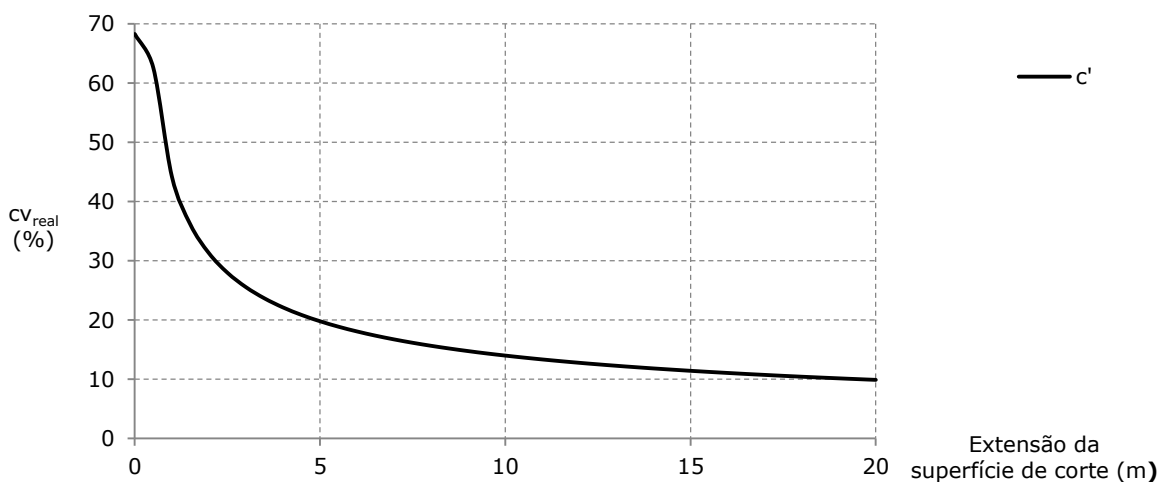


Figura 10 – Influência da escala de flutuação na redução do coeficiente de variação da coesão.

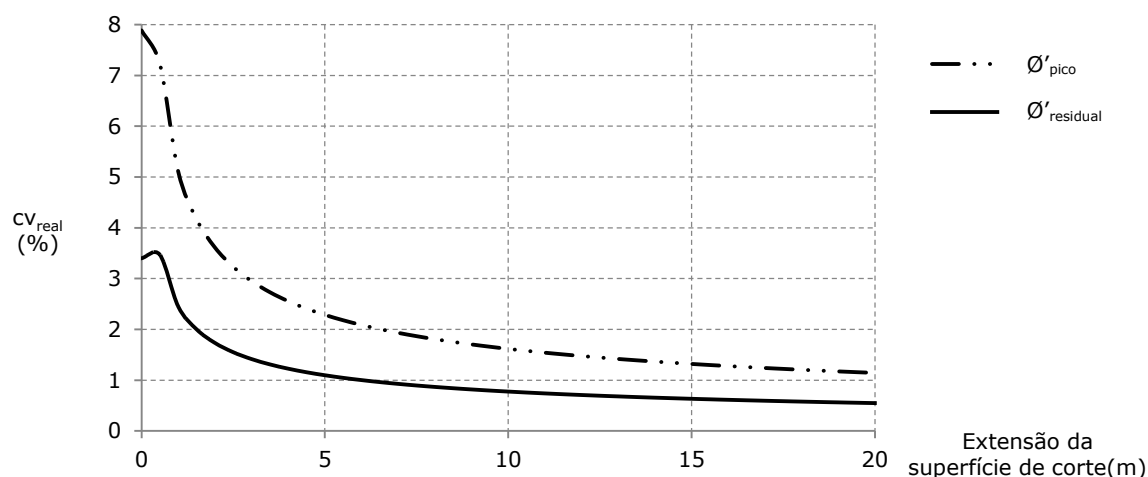


Figura 11 – Influência da escala de flutuação na redução do coeficiente de variação do ângulo de atrito de pico e do ângulo de atrito residual.

No entanto, é importante notar que as escalas de flutuação estimadas não poderiam ser maiores do que as dimensões que definem a área que serviu de base à sua determinação. De facto, tratando-se de uma área particularmente pequena para a poder considerar como uma amostra estatisticamente suficientemente representativa destes saibros graníticos extremamente heterogéneos, as estimativas apresentadas para as escalas de flutuação horizontais devem ser apenas encaradas como valores indicativos para este tipo de solos. Isto é, pretende-se, apenas, contribuir para a apresentação de procedimentos expeditos que permitam caracterizar quantitativamente a variabilidade espacial dos solos residuais em geral,

apresentado a análise e o tratamento dos resultados obtidos em 40 ensaios de corte direto realizados sob provetes de um solo residual de granito do Porto.

#### 3.2.4 - Valores Característicos

Segundo o disposto na cláusula 2.4.5.2(2) da NP EN 1997-1:2010, "o valor característico de um parâmetro geotécnico deve ser escolhido de forma a constituir uma estimativa cautelosa do valor que condiciona a ocorrência do estado limite em consideração". Portanto, quando a relação entre a escala de flutuação da resistência ao corte e a extensão da superfície de corte é tal que o comportamento do maciço é governado pela sua resistência média, é lícito afirmar que uma estimativa cautelosa da resistência ao corte desse mesmo maciço é o seu valor médio e não o valor correspondente ao quantil 5% proposto na cláusula 4.2(3) da NP EN 1990:2009. Ou seja, no caso particular de estruturas geotécnicas envolvendo um material com características semelhantes às do solo residual de granito do Porto analisado, o valor característico da resistência ao corte pode ser considerado igual ao valor médio, desde que o volume de solo mobilizado não seja muito pequeno.

### 4 - CONCLUSÕES

O solo residual de granito do Porto caracterizado no presente trabalho apresenta uma heterogeneidade litológica extremamente marcada, típica deste tipo de materiais. Contudo, os coeficientes de variação estimados para as suas propriedades físicas e mecânicas encontram-se em conformidade com os valores de referência propostos na literatura para solos sedimentares, nomeadamente para as areais, que constituem a fração granulométrica maioritária dos solos residuais de granito. A coesão efetiva é, no entanto, a exceção, uma vez que apresenta valores muito dispersos, alguns dos quais quase nulos, aos quais se encontra associado um coeficiente de variação muito próximo do limite máximo proposto na literatura para solos argilosos. Por conseguinte, afigura-se mais apropriado e sobretudo prudente adotar uma distribuição exponencial em vez de uma distribuição lognormal para modelar a variabilidade da coesão efetiva de solos residuais, nomeadamente pelo facto de, assim, se permitir que a coesão possa ser nula.

Além disso, como a resistência efetiva residual depende essencialmente do atrito puro entre partículas e o coeficiente de variação do ângulo de atrito efetivo residual é mais baixo do que o correspondente ao ângulo de atrito efetivo de pico, pode-se concluir que a variabilidade da resistência ao corte dos solos residuais se encontra sobretudo relacionada com a variabilidade da sua estrutura cimentada, que é destruída quando se atinge a resistência de pico.

Por último, é importante notar que os valores obtidos para as escalas de flutuação horizontais das resistências efetivas de pico e residual do solo residual em questão, aproximada e respetivamente 0,42 e 0,52 m – de acordo com o procedimento simplificado adotado e que tem por base uma proposta de Kulhawy e Phoon (1999) – são extremamente pequenos quando comparados com os valores de referência apontados pelos mesmos autores para outras propriedades geomecânicas de solos sedimentares (ver Quadro 2). Logo, as flutuações da resistência ao corte em torno do seu valor médio ocorrem de uma forma bastante persistente em extensões relativamente curtas, do que resulta que quando a extensão da superfície de rotura é grande comparativamente com a escala de flutuação, a resistência ao corte do maciço é governada pela sua resistência média; ou seja, nessas condições, mesmo que a resistência ao corte apresente flutuações acentuadas e uma grande dispersão quantitativa, poderá ocorrer uma redistribuição de tensões de corte para zonas adjacentes mais resistentes e, assim, compensar o facto de existirem zonas mais frágeis com menor capacidade resistente. Porém, como as propriedades geotécnicas dos solos residuais dependem de inúmeros fatores, os parâmetros estatísticos que lhe estão associados deverão naturalmente diferir substancialmente de local para local, o que significa que as escalas de flutuação horizontais apresentadas não deverão ser aplicadas cegamente a qualquer solo residual de granito. Requer-se, portanto, que no futuro sejam levados a cabo novos trabalhos de investigação com vista à criação de uma base de dados mais robusta acerca da variabilidade natural dos solos residuais e que também permitam corroborar e complementar as principais conclusões apresentadas no presente trabalho.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LABGEO-FEUP), na pessoa do Professor Viana da Fonseca, todos os recursos disponibilizados para levar a cabo os ensaios experimentais e à Geóloga Lígia Santos por ter efetuado a cartografia geológica do solo analisado.

## REFERÊNCIAS

- Baecher, G. e Christian, J. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd.
- Bolton, M. (1986). The Strength and Dilatancy of Sands. *Géotechnique*, Vol. 36, No. 1, pp. 65-78.
- Duncan, M. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. April 2000, pp. 307-316.
- Curto, J. e Pinto, J. (2009). The Coefficient of Variation Asymptotic Distribution in the Case of Non-iid Random Variables. *Journal of Applied Statistics*, 36(1), pp. 21-32;
- Forrest, W. e Orr, T. (2010). Reliability of Shallow Foundations Designed to Eurocode 7. *Georisk*, Vol. 4, No. 4, pp. 186-207.
- Kulhawy, F. e Phoon, K.-K. (1999). Characterization of Geotechnical Variability. *Canadian Geotechnical Journal* 36, pp. 612-624.
- Pinheiro Branco, L. (2011). *Aplicação de Conceitos de Fiabilidade a Solos Residuais*. Porto, Portugal, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Mestrado.
- NP EN 1990:2009 – Bases para o Projeto de Estruturas.
- NP EN 1997-1:2010 – Projeto Geotécnico – Regras Gerais.
- Shahin, M. e Cheung, E. (2011). Probabilistic Analysis of Bearing Capacity of Strip Footings. *ISGSR2011*, pp. 225-230.
- Silva Cardoso, A. e Matos Fernandes, M. (2001). Characteristic Values of Ground Parameters and Probability of Failure in Design According to Eurocode 7. *Géotechnique*, Vol. 51, No. 6, pp. 519-531.
- Viana da Fonseca, A., Matos Fernandes, M. e Silva Cardoso, A. (1997). Interpretation of a Footing Load Test on a Saprolitic Soil from Granite. *Géotecniquie*, Vol. 47, No. 3, pp. 633-651.
- Viana da Fonseca, A. e Topa Gomes, A. (2010). Project and Construction of Underground Stations and Tunnels (TBM and NATM) in Heterogeneous Masses for Metro do Porto. *Excavations and Tunnels in Granite (Túneles y Excavaciones en Granito)*, pp. 133-172. Universitat Politècnica de Catalunya, Department d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Barcelona: Paymacotas.
- Weber, M., Leemis, L. e Kincaid, R. (2006). Minimum Kolmogorov-Smirnov Test Statistic Parameter Estimates. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, Vol. 76, No. 3, pp. 195-206.
- Wickremesinghe, D. e R. Campanella (1993). Scale of Fluctuation as a Descriptor of Soil Variability. *Proceedings of the Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, Canberra*, pp. 233-239.