

VARIABILIDADE DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

Izabela Couto CAMPELLO
Engenheira Civil – Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.

Joaquim Pimenta de ÁVILA
Consultor, M.Sc. – Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.

Andrea Nascimento VECCI
Engenheira Geóloga, M.Sc. – Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.

João Lira da Matta MACHADO
Graduando em Engenharia Civil – Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.

RESUMO

Análises baseadas nos princípios de confiabilidade têm ganhado grande destaque na comunidade geotécnica, sobretudo pelo fato de que a informação disponível acerca de uma propriedade de um material geotécnico nunca é suficiente em termos de quantidade, nem totalmente precisa ou exata. Por isso se faz importante a contabilização das incertezas e da variabilidade das propriedades de solos e rochas durante a modelagem de seu comportamento, estejam elas associadas a erros de medição, número insuficiente de amostras, correlações ou à própria variabilidade intrínseca de um material no espaço. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão acerca dos principais tipos de incerteza presentes na engenharia geotécnica, e uma compilação dos valores de coeficiente de variação disponíveis na literatura, comparando-os com dados obtidos a partir de uma campanha de ensaios específica.

ABSTRACT

Principles of Reliability-Based Design have been gaining emphasis in the geotechnical community, mainly because available information about a geotechnical property are never enough in terms of quantity, neither totally precise nor exact. Therefore, it is important to account for the uncertainties and variability of soils and rocks properties when modeling their behavior, whether they are associated with measurement errors, insufficient number of samples, correlations or intrinsic material spatial variability. This paper aims to present a review about the main types of uncertainties present in geotechnical engineering, and a compilation of coefficient of variation values available in the literature, comparing them with data obtained from a site-specific testing campaign.

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 80, diversas pesquisas têm sido publicadas abordando a aplicação dos princípios de confiabilidade em projetos geotécnicos. Esta técnica, amplamente conhecida como “*Reliability-Based Design*” (Confiabilidade Aplicada a Projetos), tem como objetivo básico ajustar um conjunto de parâmetros de projeto de modo que a probabilidade de falha estabelecida não seja excedida [1].

Na prática, a informação disponível acerca de uma propriedade geotécnica nunca é suficiente em termos de quantidade, nem totalmente precisa ou exata [2]. Isto ocorre especialmente pelo fato de que os solos são afetados por diversos processos, tais como intemperismo, condições de sedimentação, propriedades das rochas originárias e a eventual ação do homem, resultando em materiais variáveis em todas as escalas, desde a microestrutura até a escala regional.

Neste contexto, o engenheiro geotécnico deve ser capaz de contabilizar as incertezas e a variabilidade durante a modelagem do comportamento dos solos. Uzielli et al. [3] destacam que em abordagens determinísticas a consideração da variabilidade não é algo explícito, diferentemente de abordagens baseadas em confiabilidade. Abordar a incerteza não aumenta o nível de segurança, mas permite um projeto mais racional, já que o engenheiro pode calibrar conscientemente suas decisões em um nível de desempenho desejado ou requerido de uma estrutura [3].

Diversos são os tipos de incerteza incorporados à estimativa de uma propriedade, sejam eles relacionados a erros de medição, número insuficiente de amostras, correlações aplicadas para obtenção de parâmetros ou à própria variabilidade intrínseca de um material ponto a ponto.

Este artigo tem como objetivo geral apresentar uma revisão acerca dos principais tipos de incerteza e dos valores de coeficiente de variação típicos existentes na literatura. Na sequência, estes valores serão comparados com coeficientes de variação obtidos a partir de uma campanha de ensaios de campo e de laboratório realizada numa barragem situada na região norte do Brasil, tendo sido investigados os materiais que compõem seu maciço e sua fundação.

2. CATEGORIAS DE INCERTEZA

Durante o processo de caracterização geotécnica, várias incertezas são incorporadas à estimativa das propriedades, incluindo a variabilidade espacial das propriedades, erros de medição, incerteza estatística e incerteza de transformação, conforme discutido nos subitens a seguir ([3], [4] e [5]) e apresentado na Figura 1.

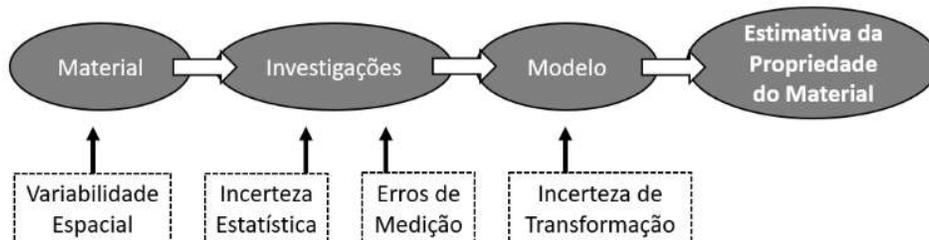


FIGURA 1: Categorias de incertezas associadas à estimativa de uma propriedade.

2.1 VARIABILIDADE ESPACIAL

As propriedades geotécnicas são afetadas pelo processo geológico de formação dos solos, grau de intemperismo, tensões às quais foram e estão submetidos, poropressões, alterações químicas e físicas, entre outros fatores. Assim, é razoável estimar que as propriedades dos solos variem de lugar para lugar em uma determinada região e, ainda, em ambas as direções, vertical e horizontal.

A variabilidade espacial independe do grau de conhecimento acerca das propriedades geotécnicas do solo em estudo e, portanto, não pode ser reduzida a partir de um maior número de investigações.

A escala de flutuação é um parâmetro estatístico comumente utilizado para descrever a correlação espacial das propriedades do solo, e é definida como a distância dentro da qual as propriedades do solo apresentam forte correlação de ponto a ponto. Assim, um elevado valor deste parâmetro indica uma menor variabilidade espacial.

2.2 ERROS DE MEDIÇÃO

Os erros de medição podem surgir a partir de três fontes: erros de equipamentos, originados a partir de instrumentos e aparatos mal calibrados e com acurácia reduzida; erros de procedimento decorrentes de conhecimento insuficiente do operador e/ou procedimentos não padronizados; e erros aleatórios de ensaios, que não são causados pela variabilidade inerente dos solos nem por erros de equipamentos ou de procedimento.

2.3 INCERTEZA ESTATÍSTICA

A incerteza estatística apresenta-se no fato de a quantidade de informação coletada em um local ser sempre limitada. A única maneira de se eliminar a incerteza estatística é investigar a população inteira, o que, na geotecnia, não é praticável.

2.4 MODELO DE TRANSFORMAÇÃO

Os ensaios de campo e de laboratório podem não fornecer diretamente as propriedades a serem utilizadas em projeto. Nestes casos, a propriedade medida pode ser convertida na propriedade de projeto a partir de modelos de transformação, os quais incluem correlações empíricas e/ou relações teóricas.

As correlações empíricas são criadas a partir de ajustes, os quais têm incertezas associadas à dispersão dos dados e à escolha do melhor ajuste. Já as relações teóricas possuem incertezas em função de idealizações e simplificações consideradas nos modelos teóricos.

3. ESTATÍSTICAS DE SEGUNDO MOMENTO

O termo “estatística” se refere a qualquer função matemática de um conjunto de dados medidos [5]. Existem infinitas estatísticas que podem ser calculadas a partir de um conjunto de dados, mas a abordagem mais utilizada é a estatística descritiva, dentro da qual são utilizadas ferramentas como gráficos e cálculo das medidas de tendência central e de dispersão dos dados.

As medidas de tendência central mais comuns são a média, mediana e moda [5]. Resumidamente, a média indica a posição em torno da qual uma série de dados se distribui, a mediana é o valor que separa a metade maior e a metade menor de um conjunto de dados e a moda é o valor mais frequente.

As medidas usuais de dispersão são o desvio padrão, o intervalo de variação (*range*) e o intervalo interquartil. O desvio padrão analisa o grau de variação de uma série de dados em torno da média, sendo calculado a partir da raiz quadrada da variância, a qual é definida como a média aritmética dos quadrados dos desvios. O intervalo de variação consiste na diferença entre o maior e o menor valor de um conjunto de dados. O intervalo interquartil avalia a dispersão dos dados após a ordenação dos dados e na divisão do conjunto em quartis; a diferença entre o quartil superior e o quartil inferior determina o intervalo interquartil.

No âmbito da engenharia geotécnica, dada a típica limitação do tamanho das amostras, é comumente aplicada a análise de segundo momento. Nesta abordagem, a incerteza em uma variável aleatória pode ser investigada a partir de seus dois primeiros momentos: a média (medida de tendência central) e o desvio padrão (medida de dispersão); momentos de ordem superiores, tais como curtose e coeficiente de assimetria, em geral não são contabilizados [2].

A partir da razão entre o desvio padrão (s) e a média (\bar{x}), tem-se uma outra medida frequentemente utilizada em análises de variabilidade: o coeficiente de variação (CV), explicitado na Equação 1.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \quad (1)$$

O coeficiente de variação é uma medida adimensional de análise da variabilidade dos dados em relação à média, assim, quanto maior for o coeficiente de variação, mais heterogênea será a dispersão dos dados. Se o valor de CV for igual a 1, a dispersão equivale a 100% da média, indicando uma alta variabilidade.

4. VARIABILIDADE TOTAL

Análises baseadas em incerteza podem, a princípio, negligenciar a natureza das incertezas e abordá-las na forma de variabilidade total [2]. Esta abordagem, no entanto, apresenta algumas deficiências. A principal delas é a avaliação excessivamente conservadora da incerteza, devido ao fato de que o importante efeito da correlação espacial não é contabilizado.

A análise da variabilidade total, portanto, dificulta um dos principais objetivos da análise baseada em incerteza, ou seja, a redução do excesso de conservadorismo na caracterização de uma propriedade, ou pelo menos uma avaliação racional do nível de conservadorismo que se está adotando [2]. Outra limitação é a impossibilidade de se tomar ações específicas que visem uma redução da incerteza total, haja vista que não se conhece o efeito de cada fonte de incerteza separadamente.

Phoon e Kulhawy [4] definiram um modelo de incerteza, descrito pela Equação 2, para se estimar o coeficiente de variação total.

$$CV_{total}^2 = \frac{\delta}{L} CV_{esp}^2 + CV_{estat}^2 + CV_{med}^2 + CV_{transf}^2 \quad (2)$$

Onde,

CV_{total}^2 é o coeficiente de variação da propriedade de projeto;

δ/L é uma estimativa da redução da variância em função da correlação espacial; δ é a escala de flutuação da propriedade e L é a distância de correlação;

CV_{esp}^2 é o coeficiente de variação da variabilidade espacial;

CV_{estat}^2 é o coeficiente de variação da incerteza estatística;

CV_{med}^2 é o coeficiente de variação do erro de medição;

CV_{transf}^2 é o coeficiente de variação da incerteza de transformação.

5. COVARIÂNCIA ENTRE PROPRIEDADES

Ao se lidar com variáveis geotécnicas, incertezas associadas às variáveis podem apresentar dependência entre elas. Conforme exemplificado por Christian e Baecher [5], ao se estimar parâmetros de coesão e ângulo de atrito a partir da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, caso seja definida uma envoltória com elevada inclinação, o intercepto de coesão deverá ser menor a fim de se obter melhor ajuste dos dados. Deve ser ressaltado que o inverso também é verdadeiro.

As incertezas podem ser dependentes por meio de várias circunstâncias, como a *dependência causal*, a *correlação probabilística*, a *correlação estatística* e a *autocorrelação espacial ou temporal* [5].

A *dependência causal* significa que um evento causa fisicamente o outro. Por outro lado, a *correlação probabilística* significa que duas incertezas podem compartilhar uma dependência comum com uma terceira.

A *autocorrelação espacial ou temporal* significa que duas incertezas dependem da realização espacial ou temporal de alguma terceira, que por sua vez exibe dependência estocástica no espaço ou no tempo. Este conceito pode ser exemplificado quando se avalia a estabilidade de duas seções de um dique extenso, onde as propriedades geotécnicas da fundação variam naturalmente na natureza. Ao ser modelado como um processo estocástico (aleatório), este material pode exibir um longo comprimento de correlação no espaço e, assim, seções adjacentes

exibirão deformações compatíveis, bem como fatores de segurança contra instabilização similares.

Por último, a *correlação estatística* significa que duas incertezas são estimadas simultaneamente a partir de um conjunto de dados e, portanto, são influenciadas por um erro comum de variabilidade amostral. Um exemplo muito comum deste caso na mecânica dos solos é a regressão usada para definir a coesão e o ângulo de atrito, citada anteriormente.

O coeficiente de correlação representa o método mais comum de se medir a dependência entre incertezas de duas variáveis geotécnicas [5]. Este método avalia a dependência linear entre duas variáveis, definida como a razão entre a “covariância” das variáveis sobre a raiz quadrada do produto da “variância” das mesmas. Segundo Christian e Baecher [5], deve-se avaliar cuidadosamente o coeficiente de correlação, uma vez que as variáveis podem apresentar uma forte relação de dependência não linear e, ao mesmo tempo, um valor insignificante deste coeficiente.

O coeficiente de correlação varia entre valores de -1 a 1, sendo que os limites extremos indicam uma forte dependência linear entre as variáveis geotécnicas. O limite superior expressa uma relação positiva e o limite inferior uma relação negativa.

Ultrapassa o escopo deste estudo a discussão aprofundada a respeito da interpretação e cálculo do coeficiente de correlação.

6. COEFICIENTES DE VARIAÇÃO

6.1 BANCOS DE DADOS DISPONÍVEIS NA LITERATURA

O coeficiente de variação de uma propriedade deve ser função dos tipos de incerteza apresentados no item 2. Adicionalmente, a análise da variabilidade de um solo deve considerar a quantificação da correlação entre as propriedades, conforme elucidado no item 5.

Os valores de coeficiente de variação existentes nas bases de dados da literatura podem ser significativamente maiores do que aqueles encontrados em um local específico, uma vez que elas são consideradas genéricas pelo fato de contemplarem dados de materiais com diversos tipos de características [1].

Dentre as fontes de incerteza citadas no item 2, destaca-se que os erros de medição, em geral, independem do local específico, pois estão relacionados a procedimentos de equipamentos e aos operadores. A variabilidade natural e as incertezas de transformação, por sua vez, são potencialmente dependentes do local específico.

Um grande acervo de estatísticas de segundo momento de propriedades geotécnicas está atualmente disponível na literatura. Estes dados, em geral, pertencem a grupos de investigações e ensaios em solos considerados, de alguma forma, de uma mesma classe granulométrica (por exemplo, solos argilosos). É extremamente difícil, na prática, avaliar as várias fontes de incertezas

separadamente. Por consequência, os coeficientes de variação das propriedades, usualmente reportados na literatura como “variabilidade natural” (também conhecida como espacial ou inerente), se referem à variabilidade total; portanto, seus valores são geralmente superestimados quando comparados à real magnitude da variabilidade natural isoladamente [3].

Uma abrangente pesquisa sobre intervalos de coeficientes de variação existentes na literatura foi realizada neste trabalho, a qual está sintetizada na Tabela 1.

Ensaio	Parâmetro	Solo	COV(%)	Referência
Ensaio de Palheta (<i>Vane shear test</i>)	Su	Argila	10-40	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Argila	13-36	Kulhawy et al., 2000 [6]
		Argila	15-50	Phoon et al., 1995 [7]
		Granul. Fina	10-20	Kulhawy, 1992 [8]
Compressão simples		Argila	20-55	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Argila	20-55	Phoon et al. 1995 [7]
		Granul. Fina	6-56	Phoon & Kulhawy, 1999a [9]
Triaxial - UU		Argila	10-30	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Argila	10-35	Phoon et al. 1995 [7]
		Argila, silte	11-49	Phoon & Kulhawy, 1999a [9]
Triaxial - CIU		Argila	20-40	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Argila	20-45	Phoon et al., 1995 [7]
		Argila	18-42	Phoon & Kulhawy, 1999a [9]
Ensaio não identificado		Argila	6-80	Kulhawy et al., 2000 [6]
	Argila	6-80	Phoon & Kulhawy, 1999a [9]	
	Granul. Fina	13-40	Harr, 1987 [10]; Kulhawy, 1992 [8]; Lacasse e Nadim, 1996 [11]	
	Granul. Fina	20-50	Lumb, 1974 [12]; Singh, 1971 [13]	
Laboratorial*	ϕ'	Argila e areia	5-15	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Argila e areia	4-50	Kulhawy et al., 2000 [6]
		Areia	4-15	Kulhawy et al., 2000 [6]
		Argila	10-50	Kulhawy et al., 2000 [6]
		Areia	5-11	Phoon & Kulhawy, 1999a [9]
		Argila e silte	10-50	Phoon & Kulhawy, 1999a [9]
		Areia	5-14	Phoon & Kulhawy, 1999a [9]
		Solo	4-20	Sandroni e Sayão, 1992* [14]
		Areia	2-13	Harr, 1987 [10]; Kulhawy, 1992 [8]; Duncan, 2000 [15]
		Areia	5-15	Lumb, 1974 [12]; Hoeg e Murarka, 1974 [16]; Singh, 1971 [13]
Triaxial		Solo residual	42,09	Koppe, 1982 [17]
Laboratorial*	ϕ	Areia e argila	7-20	Phoon et al., 1995 [7]
Ensaio não identificado		Argila	12-56	Lumb, 1974 [12], Singh, 1971 [13]
		Argila	20-50	Miranda **** [18]
		Areia	5-15	Miranda **** [18]
		Areia	2-5	Baecher, 2003*** [5]

TABELA 1: Intervalos típicos de coeficientes de variação de propriedades geotécnicas

Ensaio	Parâmetro	Solo	COV(%)	Referência
Laboratorial*	ϕ	Solo residual	45,28	Koppe, 1982 [17]
Triaxial		Solo residual	49,95	Koppe, 1982 [17]
Triaxial	$tg\phi'$	Argila e silte	6-46	Phoon & Kulhawy, 1999a [9]
Cisalhamento Direto		Argila e silte	6-46	Phoon & Kulhawy, 1999a [9]
Triaxial CU e CD		Solo resid. Gnaisse	51	Pacheco, 1991 [19]
-	c'	Solo	20-80	Sandroni e Sayão, 1992* [14]
Triaxial CU e CD		Solo res. Gnaisse	20	Pacheco, 1991 [19]
Laboratorial*		Solo residual	133,35	Koppe, 1982 [17]
-	c	Solo	20-50	Sandroni e Sayão, 1992* [14]
Triaxial		Solo residual	120,8	Koppe, 1982 [17]
-	Su/s'_{v0}	Argila	5-15	Baecher, 2003*** [5]
CPT	qt	Argila	<20	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Argila	20-40	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
	qc	Areia	20-60	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Argila	53	Uzielli et al., 2006 [3]
qu	Argilo-siltoso	54	Uzielli et al., 2006 [3]	
	Argila e Areia	25-50	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]	
SPT	N	Solo	15-45	Harr, 1987 [10]; Kulhawy, 1992 [8]
		Solo	10-70	Phoon and Kulhawy, 1999a [9]
		Argila	10-35	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
DMT	A	Areia	20-50	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Argila	10-35	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
	B	Areia	20-50	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Argila	10-35	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
	Id	Areia	20-60	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
	Kd	Areia	20-60	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
Ed	Areia	15-65	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]	
Índices de Laboratório	LL	Argila e Silte	6-30	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Granul. Fina	7-39	Kulhawy et al., 2000 [6]
		Argila	21	Uzielli et al., 2006 [3]
		Argilo-sitoso	27	Uzielli et al., 2006 [3]
		Solo	2-48	Lumb, 1974 [12]; Singh, 1971 [13]; Kuhn, 1971 [20]; Mitchell, 1993 [21]
		Solo residual	26,27	Koppe, 1982 [17]
		Argila	5-20	Baecher, 2003*** [5]
	LP	Argila e Silte	6-30	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Granul. Fina	6-34	Kulhawy et al., 2000 [6]
		Argila	14	Uzielli et al., 2006 [3]
		Argilo-siltoso	15	Uzielli et al., 2006 [3]
		Solo	7-79	Lumb, 1974 [12]; Singh, 1971 [13]; Kuhn, 1971 [20]; Mitchell, 1993 [21]
		Solo residual	27,20	Koppe, 1982 [17]
		Argila	3-20	Baecher, 2003*** [5]

TABELA 1: Intervalos típicos de coeficientes de variação de propriedades geotécnicas (continuação)

Ensaio	Parâmetro	Solo	COV(%)	Referência
Índices de Laboratório	Wn	Argila e Silte	8-30	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Granul. Fina	7-46	Kulhawy et al., 2000 [6]
		Argila	17	Uzielli et al., 2006 [3]
		Argilo-sitoso	17	Uzielli et al., 2006 [3]
	IP	Argilo-siltoso	44	Uzielli et al., 2006 [3]
		Solo	9-29	Lumb, 1974 [12]; Singh, 1971 [13]; Kuhn, 1971 [20]; Mitchell, 1993 [21]
		Solo	7-79	Lumb, 1974 [12]; Singh, 1971 [13]; Kuhn, 1971 [20]
		Solo residual	36,79	Koppe, 1982 [17]
		Argila e Silte	(3-12%)/ média	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Granul. Fina	9-57	Kulhawy et al., 2000 [6]
		Argila	34	Uzielli et al., 2006 [3]
	γ_d	Argila e Silte	<10	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
		Granul. Fina	10-20	Kulhawy et al., 2000 [6]
		Argila	3	Uzielli et al., 2006 [3]
		Argilo-siltoso	3	Uzielli et al., 2006 [3]
		Solo	2-8	Sandroni e Sayão, 1992** [14]
		Solo residual	1,89	Koppe, 1982 [17]
	Dr	Areia	10-40 (direto), 50-70 (indireto)	Phoon and Kulhawy, 1999 [4]
	Densidade	Solos	3-7	Harr, 1987 [10]; Kulhawy, 1992
			5-10	Baecher, 2003*** [5]
Notas:				
*	Harr 1987			
**	Lumb 1974 ; Lee et al, 1983 ; Pacheco, 1991 ; Christian et al, 1992			
***	Lacasse and Nadim (1996), Lumb (1974)			
****	Lee et al., 1983			

TABELA 1: Intervalos típicos de coeficientes de variação de propriedades geotécnicas (continuação)

A partir da pesquisa foi possível observar que os intervalos típicos de coeficientes de variação oscilam na literatura em função de condicionantes variáveis: tipo do solo, parâmetro analisado, natureza e tipo de ensaio, número de amostras analisadas, dentre outros.

A Figura 2 e a Figura 3 reúnem as faixas de valores de coeficientes de variação existentes na literatura para as propriedades *Resistência ao Cisalhamento Não Drenada* – típica de solos argilosos – e *Ângulo de Atrito*.

Observa-se na Figura 2 que as faixas de valores de CV para S_u não apresentam grande dispersão entre os tipos de ensaios, com exceção daqueles grupos nos quais o tipo de ensaio não foi identificado. De forma geral, nota-se uma concentração em torno do valor médio de CV igual a 30%.

Já na Figura 3 os intervalos foram identificados em função da granulometria predominante do material, sendo que a origem dos dados foram ensaios laboratoriais. Observa-se que os valores de CV para solos predominantemente arenosos são inferiores aos valores dos grupos que contêm materiais argilosos. Neste caso, o valor médio de CV igual a 15% é pouco representativo e torna-se prudente, pois, definir diferentes valores típicos de CV para cada tipo de solo.

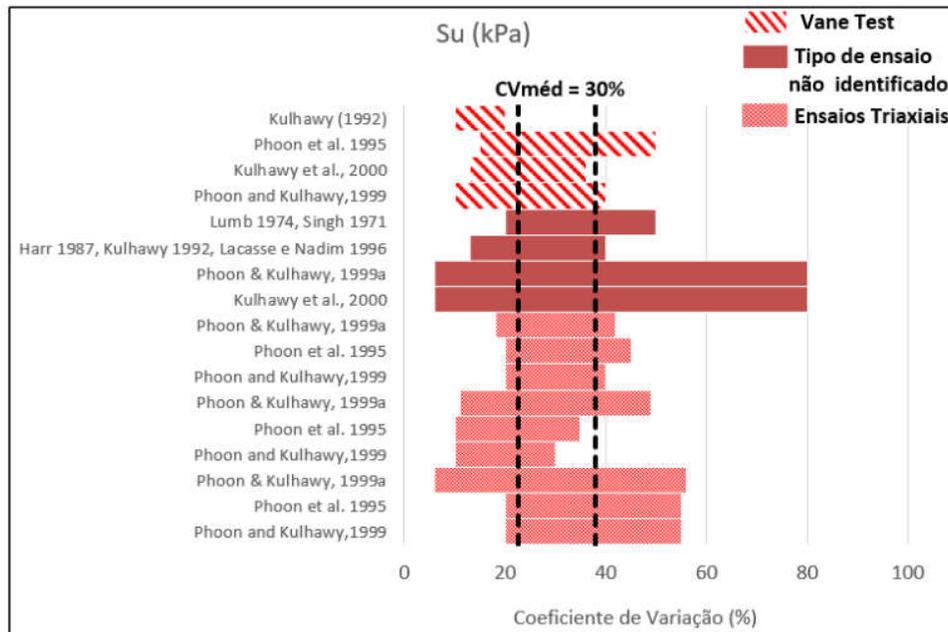


FIGURA 2: Intervalos de coeficientes de variação para o parâmetro Resistência ao Cisalhamento não Drenada.

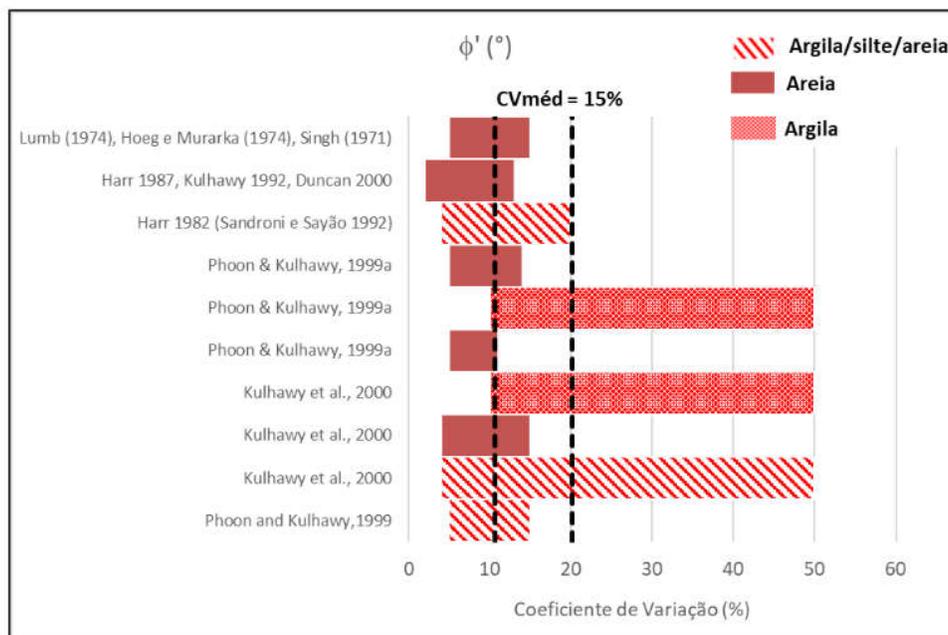


FIGURA 3: Intervalos de coeficientes de variação para o parâmetro Ângulo de Atrito Efetivo.

6.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS BANCOS DE DADOS DISPONÍVEIS E OS RESULTADOS OBTIDOS EM UMA CAMPANHA ESPECÍFICA

O estudo de caso do presente trabalho compreende uma barragem situada na região norte do Brasil, tendo sido investigados os materiais que compõem seu maciço e sua fundação.

A barragem foi implantada em uma área impactada pela atividade de extração de minério de bauxita, aproveitando-se as pilhas de estéril – anteriormente dispostas durante o processo de lavra – e conformando-as com a execução de aterro compactado formado pelo próprio estéril. Dessa forma, o maciço possui seção mista formada por material estéril lançado e compactado. Este material constitui-se de uma argila caulínica de cor amarela. Abaixo desta camada encontra-se uma espessa camada de material (superior a quinze metros) caracterizado como argila variegada. A argila variegada representa a fundação in situ, e compreende um material de textura argilosa, por vezes argilo-siltosa e arenosa de cores laranja, vermelha, marrom, roxo e rosa com presença de porções esbranquiçadas.

A Tabela 2 apresenta os coeficientes de variação calculados a partir dos ensaios disponíveis, enquanto as Figuras 4 a 12 apresentam uma comparação entre estes valores e as faixas de valores encontradas na literatura.

Tabela 2: Coeficientes de variação calculados

Parâmetro	Ensaio *	Argila Amarela Compactada		Argila Amarela Lançada		Argila Variegada	
		CV	Nº de ensaios	CV	Nº de ensaios	CV	Nº de ensaios
Su	Vane	61%	32	73%	209	50%	66
	DSS	35%	12	38%	15	16%	30
	CIU	42%	33	42%	60	43%	21
	SPT	68%	428	53%	883	38%	483
Ângulo de Atrito	CIU	8%	10	16%	21	16%	12
Coesão	CIU	35%	10	64%	21	66%	12
Razão de resistência	CIU	27%	33	38%	60	30%	21
Peso específico natural	Lab	5%	10	4%	21	3%	12
Peso específico seco	Lab	7%	10	7%	21	4%	12
LL	Lab	14%	9	13%	21	14%	7
LP	Lab	16%	9	17%	21	10%	7
IP	Lab	29%	9	28%	21	22%	7
Teor de umidade	CIU	9%	10	14%	18	6%	10
	Lab	7%	3	9%	21	-	-
	Comp	13%	40	18%	90	-	-

*Notas: Vane = *Vane Shear Test*; DSS = ensaio de cisalhamento direto simples; CIU = ensaio de compressão triaxial adensado isotropicamente e não drenado; Lab = ensaio laboratorial (para o teor de umidade, "Lab" se refere à umidade de campo); Comp = ensaio de compactação.

A partir da Tabela 2, e em consonância com os valores compilados na Tabela 1, é possível observar que os CV obtidos para os parâmetros coesão, resistência não drenada, razão de resistência e índice de plasticidade são significativamente maiores do que os CVs para os demais parâmetros, tais como ângulo de atrito e peso específico.

O fato de a variabilidade da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) ser maior do que a do ângulo de atrito é consistente com o fato de que esta primeira não é uma propriedade fundamental do solo, mas sim derivada a partir de parâmetros que dependem de uma série de fatores externos, como taxa de carregamento, procedimento de ensaio e condições de contorno (Kulhawy and Mayne, 1990, *apud* Kulhawy, Phoon e Prakoso [6]).

Na Figura 4 observa-se que os CVs calculados para o ângulo de atrito dos solos do estudo de caso estão dentro da faixa de valores existentes na literatura, assim como na Figura 5, que correlaciona o coeficiente de variação com o valor médio da propriedade. Na Figura 5 as áreas hachuradas foram extraídas do trabalho de Uzielli et al. [3] e Phoon e Retief [1], sobre as quais foram plotados os pares de pontos “média; CV” calculados a partir dos ensaios.

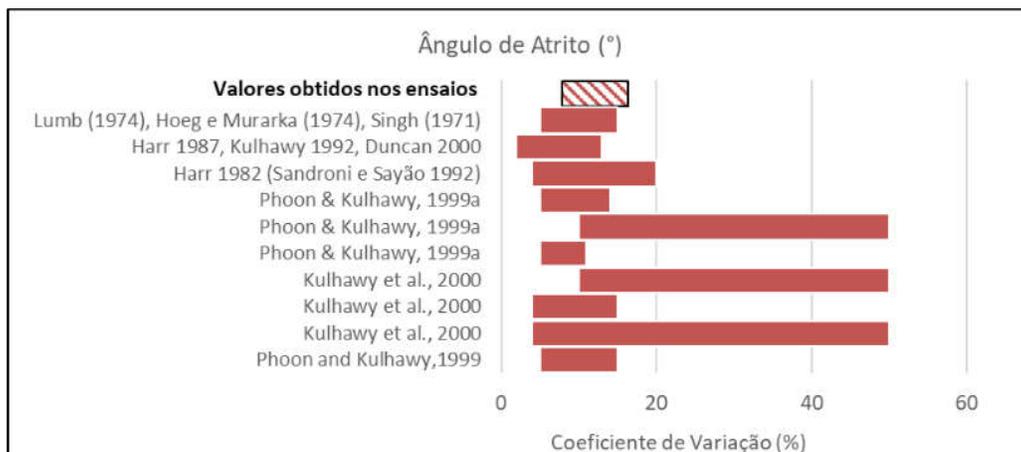


FIGURA 4: Ângulo de Atrito Efetivo – Comparação entre os intervalos de CV.

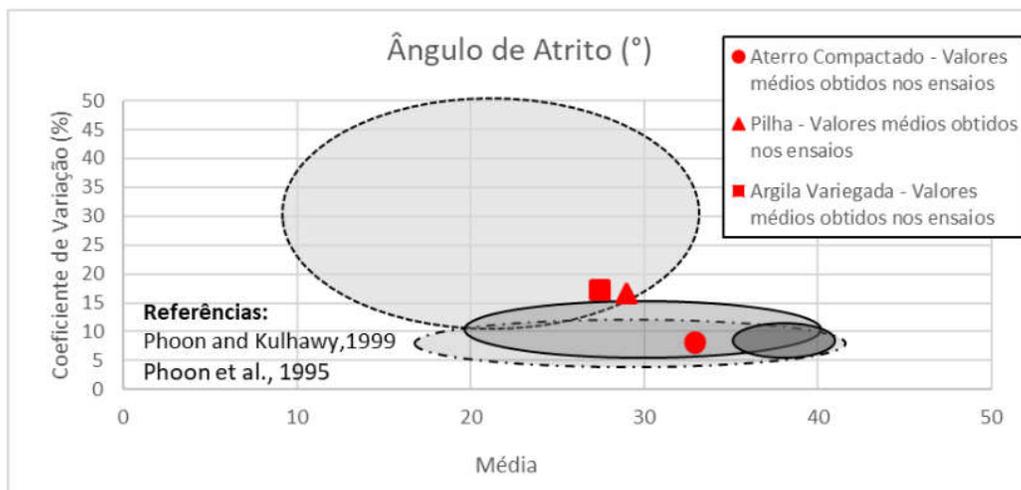


FIGURA 5: Ângulo de Atrito Efetivo – Comparação CV versus valor médio da propriedade.

Na Figura 6 é apresentada uma comparação entre o coeficiente de variação e o valor médio da resistência não drenada para cada solo do estudo de caso e as faixas de valores existentes na literatura. As áreas hachuradas foram extraídas do trabalho de Uzielli et al. [3] e Phoon e Retief [1], sobre as quais foram plotados os pares de pontos “média; CV” calculados a partir dos ensaios.

Como os valores propostos na literatura são abrangentes, a faixa obtida a partir dos ensaios se ajusta às faixas de referência. Na Figura 7 os CVs obtidos nos ensaios foram divididos em dois grupos: ensaios de laboratório e ensaios gerais. É facilmente percebido que os ensaios laboratoriais apresentam menor variabilidade do que o grupo total de ensaios.

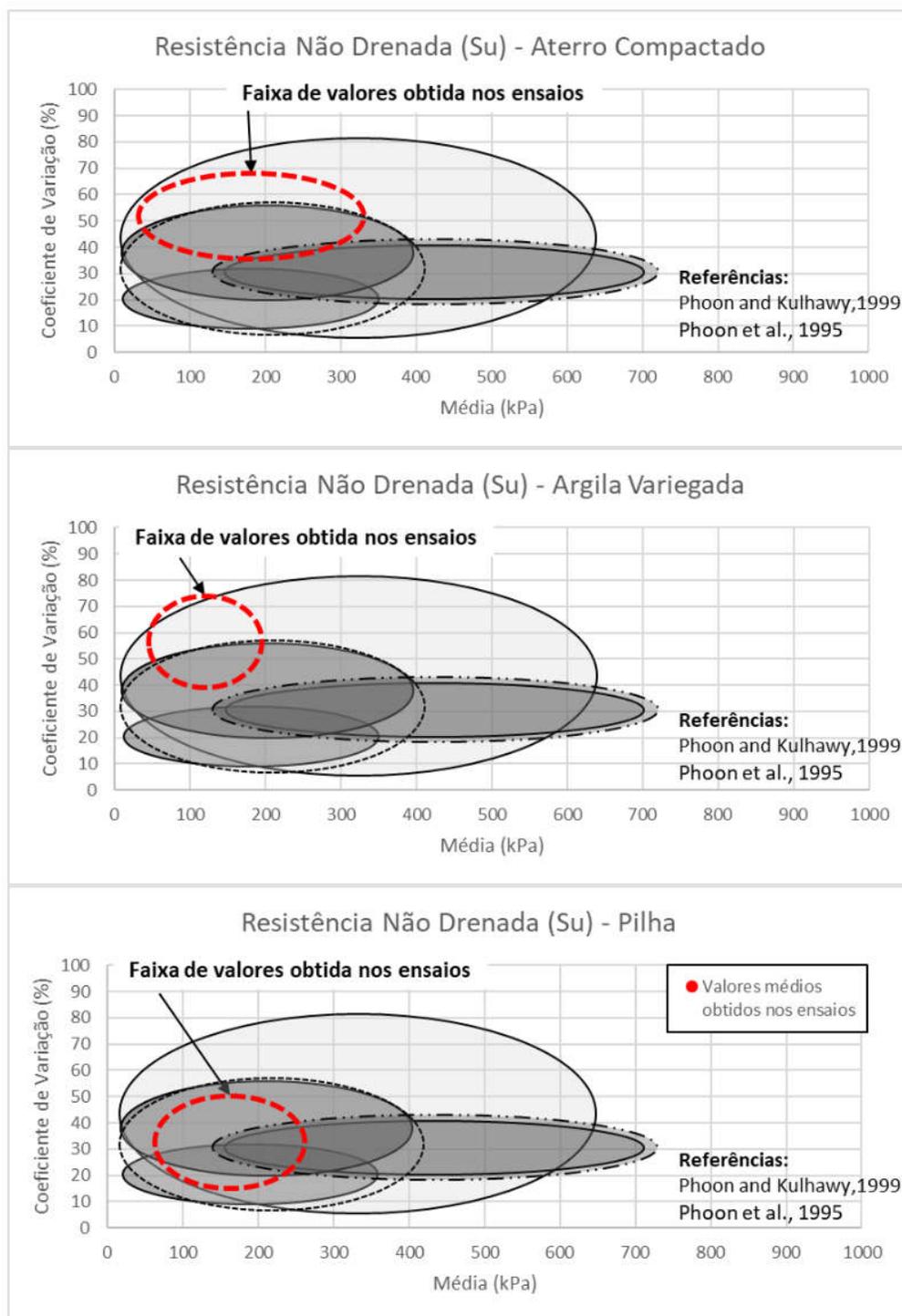


FIGURA 6: Resistência Não Drenada – Comparação CV *versus* valor médio da propriedade.

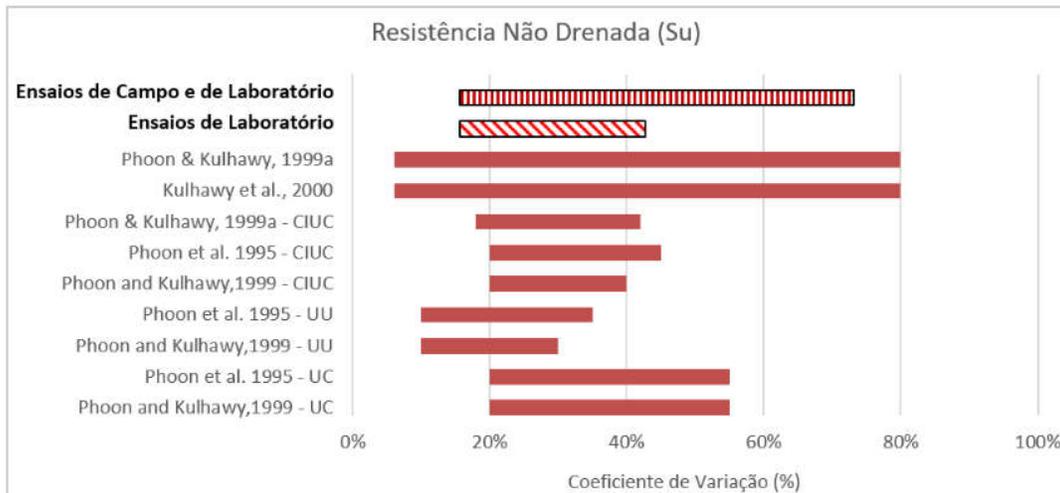


FIGURA 7: Resistência Não Drenada – Comparação entre os intervalos de CV.

A partir da Figura 8 é possível identificar que a faixa de valores de razão de resistência ao cisalhamento proposta pelos autores Baecher e Christian [5], 5 a 15%, é bastante inferior aos CVs calculados para os solos do estudo de caso, 27 a 38%.



FIGURA 8: Razão de Resistência ao Cisalhamento – Comparação entre os intervalos de CV.

A Figura 9 mostra que a faixa de CV obtida nos ensaios para o intercepto de coesão efetiva se enquadra na faixa proposta pelos autores Sandroni e Sayão [14], 20 a 80%, apresentando aproximadamente o mesmo valor médio.

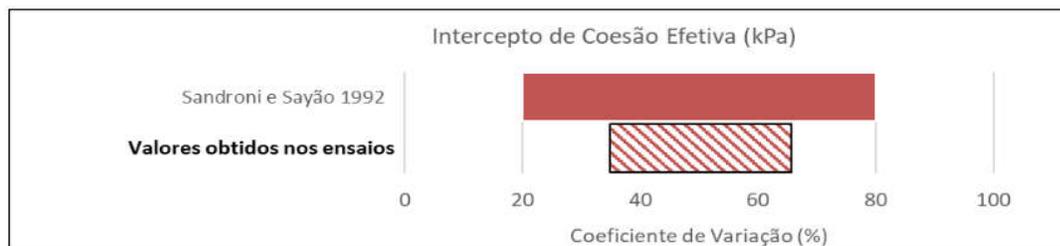


FIGURA 9: Intercepto de Coesão Efetiva – Comparação entre os intervalos de CV.

A Figura 10 indica faixas variadas para os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) e para o índice de plasticidade (IP), mas, de forma geral, é possível afirmar que as faixas identificadas na bibliografia englobam as faixas obtidas nos ensaios. Observa-se ainda que os CVs do IP são superiores aos do LL e LP. Isto ocorre, segundo [6], porque o IP não é uma propriedade medida diretamente, e sim derivada a partir das medidas de LL e LP. Logo, o IP é afetado pelas incertezas nas medições de LL e LP.

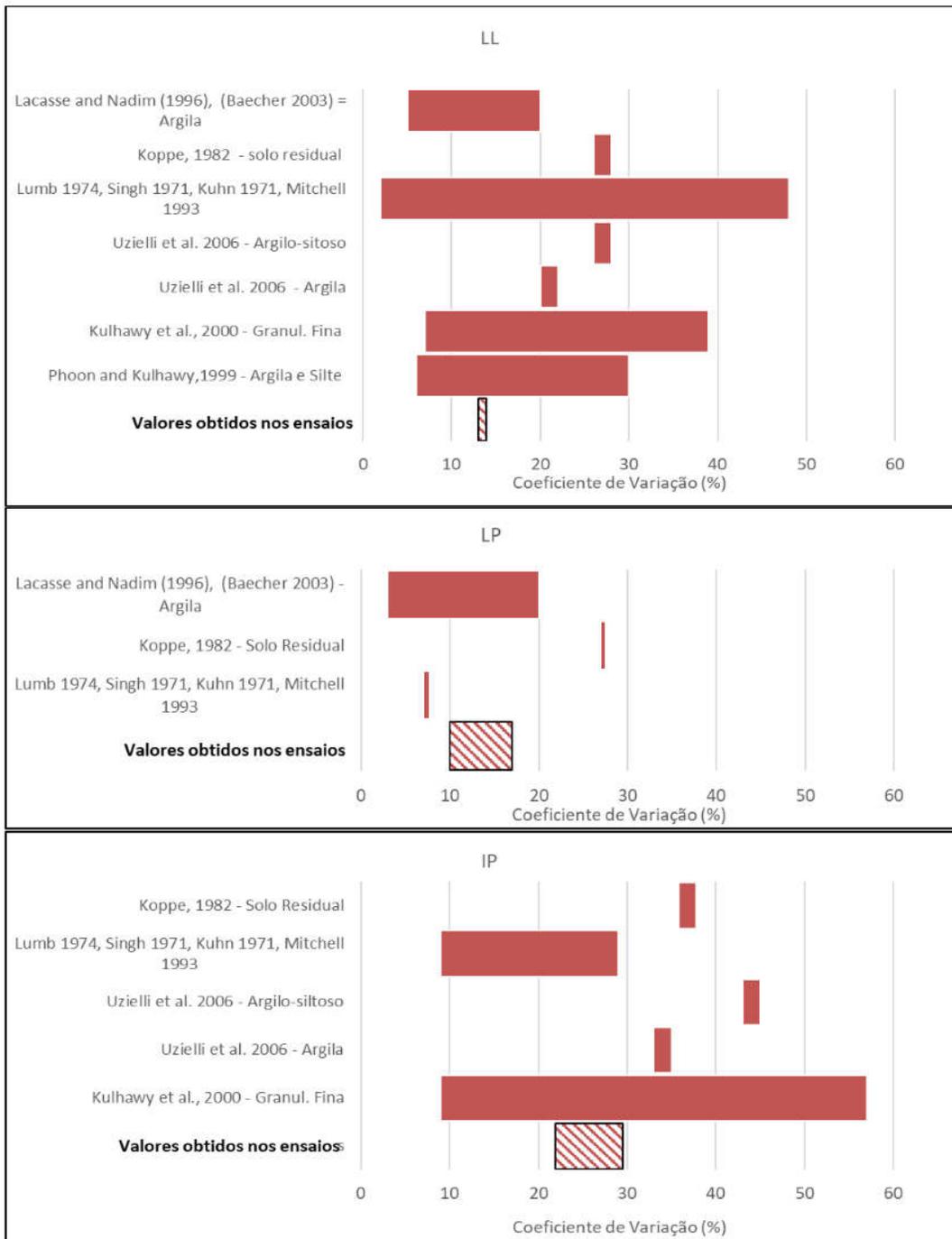


FIGURA 10: LL, IP e LP – Comparação entre os intervalos de CV.

A Figura 11 indica que o limite inferior da faixa dos CVs obtidos para o teor de umidade é a mesma, tanto para os dados dos ensaios quanto para os dados disponíveis na literatura. Já o limite superior da faixa dos CVs obtidos a partir dos ensaios é inferior à existente na literatura.

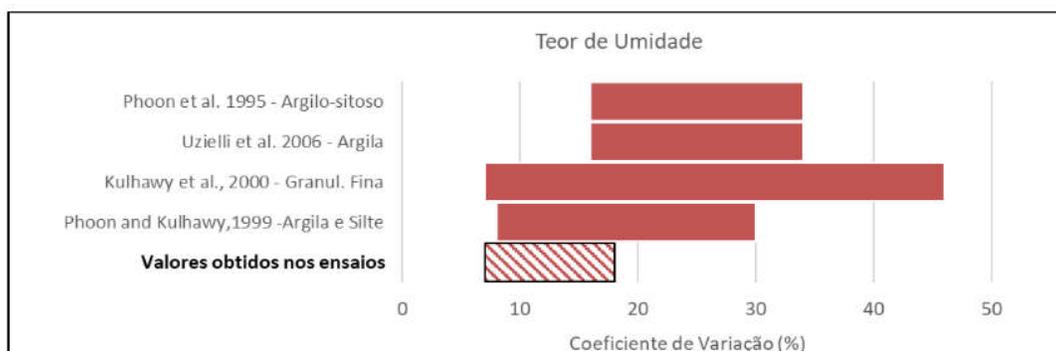


FIGURA 11: Teor de Umidade – Comparação entre os intervalos de CV.

A Figura 12 apresenta, tanto para o peso específico natural quanto para o peso específico seco, CVs aderentes às faixas de referência apresentadas na literatura.

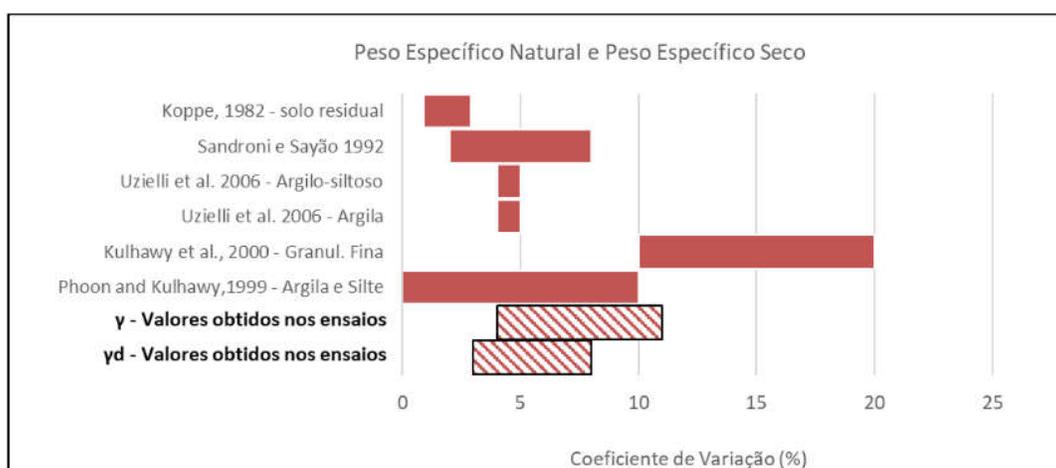


FIGURA 12: Peso Específico – Comparação entre os intervalos de CV.

O intuito da compilação de dados de trabalhos anteriores foi a tentativa de associação de valores de coeficientes de variação registrados na literatura (Tabela 1), com os valores aqui calculados (Tabela 2) a partir das campanhas de investigações geológico-geotécnicas disponíveis.

A sugerida comparação entre CV calculado versus CV bibliográfico visa contribuir no julgamento da real assertividade de resultados de análises realizadas com parâmetros definidos por coeficientes de variação de literatura, em ocasiões nas quais não haja número de ensaios suficiente para se determinar valores de parâmetros que se aproximem, ao máximo, das reais propriedades geotécnicas do solo em estudo.

As comparações realizadas no presente trabalho indicam que quando se tem um grande número de referências disponível na literatura, este contribui para a convergência de uma faixa média de valores de CVs. Do contrário, as faixas ficam dispersas, sendo difícil estabelecer valores de referência. De uma forma geral, é possível concluir que os CVs das propriedades obtidos a partir dos ensaios se enquadram nas faixas disponíveis na literatura, com exceção da razão de resistência não drenada, para a qual foram identificadas poucas referências na bibliografia.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma revisão acerca dos principais tipos de incerteza presentes na engenharia geotécnica (variabilidade espacial, erros de medição, incerteza estatística e incerteza de transformação), além de uma explanação acerca das medidas de tendência central e de dispersão dos dados, do coeficiente de variação e da covariância entre propriedades. Adicionalmente, foi apresentada uma compilação dos valores de coeficiente de variação disponíveis na literatura, comparando-os com dados obtidos a partir de uma campanha de ensaios específica.

Embora não tenham sido objeto de estudo do presente trabalho, o tratamento estatístico dos dados disponíveis, incluindo o ajuste das curvas de distribuição de probabilidade, a quantificação da escala de flutuação e variabilidade espacial, bem como a correlação multivariada entre as variáveis, são fundamentais para uma adequada caracterização das propriedades geotécnicas.

Segundo Phoon e Retief [1], o Anexo D (Confiabilidade de Estruturas Geotécnicas) da norma ISO 2394:2015 (“*General Principles on Reliability*” – Princípios Gerais em Confiabilidade) é um importante passo para o desenvolvimento de projetos geotécnicos baseados em confiabilidade. Um trecho deste anexo, que enfatiza a variabilidade dos chamados “geomateriais”, foi adaptado a partir do trabalho de Phoon e Retief [1] e é apresentado a seguir:

- Os coeficientes de variação dos parâmetros geotécnicos podem ser elevados porque os “geomateriais” são materiais naturais e sua variabilidade *in situ* não pode ser reduzida (ao contrário da maioria dos materiais estruturais, cuja fabricação se dá a partir de um controle de qualidade).
- Os coeficientes de variação de parâmetros geotécnicos não são únicos e podem variar em uma ampla faixa, dependendo do tipo de ensaio utilizado.
- Como as características dos parâmetros geotécnicos são diferentes de um local para outro, é boa prática executar uma investigação para cada região de interesse. Por esta razão, a incerteza estatística deve ser especialmente observada.
- É boa prática a realização tanto de ensaios de campo quanto de laboratório; destaca-se que os parâmetros geotécnicos estão comumente correlacionados com mais de um tipo de ensaio e/ou tipos de propriedades. Portanto, é importante considerar essa estrutura de correlação multivariada sempre que possível, uma vez que o coeficiente de variação de um parâmetro de projeto reduz quando o nível de consistência das informações aumenta.
- A variabilidade espacial dos parâmetros geotécnicos não pode ser prontamente descartada dentro de um problema, pois sua consideração contribui para a redução dos coeficientes de variação, particularmente na direção vertical.
- Existem muitos modelos diferentes de cálculos geotécnicos para o mesmo problema de projeto. Portanto, a calibração do modelo com base em ensaios

de campo específicos da região em que o projeto está inserido é muito importante.

Os elementos destacados no Anexo D da ISO 2394:2015 não apresentam conclusões inovadoras ou singulares, mas contribuem para uma reflexão a respeito da consideração da confiabilidade na prática geotécnica.

Os dados apresentados no item 6 podem ser considerados úteis para fins de referência, mas não devem ser utilizados de maneira indiscriminada, uma vez que as propriedades, conforme explicado anteriormente, podem depender de diversos fatores, como do estado de tensão *in situ*, do tipo de ensaio a partir do qual a propriedade foi inferida e do tipo de solo.

Conforme concluído, um grande número de referências disponível na literatura contribui para a convergência de uma faixa média de valores de CVs. Do contrário, as faixas ficam dispersas, sendo difícil estabelecer valores de referência.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Pimenta de Ávila Consultoria pelo contínuo incentivo ao aprendizado de seus colaboradores, em especial ao Joaquim Pimenta.

9. PALAVRAS-CHAVE

Confiabilidade, Variabilidade geotécnica, Coeficiente de variação, Incerteza, Estatística.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PHOON, K.K. e RETIEF, J.V. (2016) – “Reliability of geotechnical structures in ISO2394”, CRC Press, London, UK;
- [2] UZIELLI, M. (2008) – “Statistical analysis of geotechnical data”, International Conference on Site Characterization, Taiwan;
- [3] UZIELLI, M., LACASSE, S., NADIM, F. e PHOON, K.K. (2006) – “Soil Variability Analysis for Geotechnical Practice”, International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Singapura;
- [4] PHOON, K.K. e KULHAWY F.H. (1999) – “Characterization of geotechnical variability”, Canadian Geotechnical Journal, Volume 36, Número 4, p. 612–624;
- [5] BAECHER, G.B. e CHRISTIAN, J.T. (2003) – “Reliability and statistics in geotechnical engineering”, John Wiley & Sons Inc., New York;
- [6] KULHAWY, F.H., PHOON, K.K. e PRAKOSO W.A. (2000) – “Uncertainty in basic properties of geomaterials”, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, Austrália;

- [7] PHOON, K-K., KULHAWY, F. H., e GRIGORIU, M. D. (1995) – “Reliability based design of foundations for transmission line structures”, Electric Power Research Institute, Palo Alto;
- [8] KULHAWY, F.H. (1992) – “On evaluation of static soil properties. In Stability and performance of slopes and embankments II (GSP 31)”, American Society of Civil Engineers, Nova York, pp. 95–115;
- [9] PHOON, K.K. e KULHAWY, F.W. (1999) – “Evaluation of geotechnical property variability”, Canadian Geotechnical Journal, Volume 36, Número 4, p. 625-639;
- [10] HARR, M. E. (1987) – “Reliability-Based Design in Civil Engineering”, McGraw-Hill, Nova York;
- [11] LACASSE, S. e NADIM, F. (1996) – “Uncertainties in characterizing soil properties”, Em Uncertainty in the Geologic Environment: From theory to Practice, Publicação Especial de Geotecnia, Volume 1, p.49–75, ASCE;
- [12] LUMB, P. (1974) – “Application of statistics in soil mechanics”, editora Newnes-Butterworths, Capítulo 3, pp 44-111, Londres;
- [13] SINGH, A. (1971) – “How reliable is the factor of safety in foundation engineering?”, 1ª International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, p. 389–424, University Press, Hong Kong;
- [14] SANDRONI, S.S. e SAYÃO, A.S.F.J. (1992) – “Avaliação estatística do coeficiente de segurança de taludes”, 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro;
- [15] DUNCAN, J.M. (2000) – “Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 126, Number 4, pp.307 – 316;
- [16] HOEG, K. e MURARKA, R.P. (1974) – “Probabilistic Analysis and Design of a Retaining Wall”, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Volume 100, Number 3, pp. 349 – 366.
- [17] KOPPE, J.C. (1982) – “Caracterização geotécnica e análise estatística de um solo residual da formação Rosário do Sul na região do 3º polo petroquímico – RS”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre;
- [18] MIRANDA, L. (desconhecido) – “The influence of geotechnical variability in the subsidence caused by urban tunnel excavation”, Técnico Lisboa, Lisboa;
- [19] PACHECO, M. (1990) – “Conceitos de probabilidade e análise de risco em estudos e projetos de geotecnia”, IX COBRAMDEF, pp. 35-36, Salvador, BA;
- [20] KUHN, S. H. (1971) – “Quality Control in Highway Construction”, 1ª International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, p. 287 – 312, University Press, Hong Kong;

- [21] MITCHELL, J. K. (1993) – “Fundamentals of Soil Behavior”, John Wiley & Sons, Nova York.