



ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA OBTIDOS POR ENSAIOS TRIAXIAIS E POR CORRELAÇÃO COM O N-SPT

Felipe Augusto Magalhães Guerra
Mariana, Brasil, fguerrageotec@gmail.com

RESUMO: A parametrização geotécnica para realização de estudos com modelos computacionais é, comumente obtida por ensaios de campo e laboratório. No caso dos parâmetros de resistência, em alguns materiais, principalmente materiais homogêneos e com coesão nula ou próxima à nulidade, correlações com os ensaios SPT podem ser utilizadas para definição dos ângulos de atrito. Foram analisados dois materiais distintos nos quais houve ensaios de SPT em campo e ensaios triaxiais (CIUsat) em laboratório. As análises foram feitas obtendo-se os parâmetros de resistência, no caso o ângulo de atrito por se tratarem de materiais predominantemente arenosos, através das análises dos ensaios de laboratórios por metodologias tradicionais (definição pela trajetória de tensões efetivas $p'xq'$) e através da correlação proposta por Hatanaka & Uchida, 1996. Com os dados obtidos foi possível realizar uma comparação entre ambos e verificar a usabilidade em análises de estabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: parâmetros de resistência, correlações N-SPT, ensaios triaxiais, ângulo de atrito

1 INTRODUÇÃO

As grandes obras geotécnicas, visando a segurança vinculada com um projeto embasado em dados experimentais para tal, necessitam de uma definição assertiva da parametrização dos materiais envolvidos na construção. Para a obtenção dos parâmetros de resistência, as formas mais comuns para tal, são os ensaios de laboratório ou ensaios de campo. Os ensaios de laboratório, triaxiais e cisalhamento direto, retornam com os parâmetros de forma direta utilizando-se metodologias de cálculo comumente baseadas no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Já os ensaios de campo, no caso o SPT dado ser o mais utilizado, determina parâmetros de resistência por correlações empíricas de diversos estudiosos. A comparação entre os dois métodos de obtenção de parâmetros de resistência se faz válida na tentativa de verificar a aplicabilidade do segundo, comparando-o com uma metodologia mais precisa.

No presente estudo foram feitas análises comparativas entre parâmetros obtidos por ensaios triaxiais e por correlações com ensaios SPT. Os materiais utilizados são de natureza arenosa, com coesão próxima da nulidade e, com isso, as correlações utilizadas são para tais tipos de solos. Além disso, são materiais provenientes de depósitos antrópicos, podendo ser considerados homogêneos.

Com isso, busca-se apresentar os resultados obtidos, a fim de demonstrar as eficácias de métodos empíricos, baseados em sondagens com ensaios SPT, para a definição de parâmetros de resistência, quando se tratando de materiais de natureza arenosa e predominantemente homogêneos ao longo de sua profundidade. Este estudo mostra, por exemplo, a possibilidade de se utilizar em projetos conceituais ou básicos, para materiais com características similares ao estudado, parâmetros obtidos por correlações, no caso da falta ou dificuldade de realização de ensaios de laboratório.



2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Foram utilizados dois tipos de material nos estudos realizados neste trabalho, sendo um o rejeito do processo de beneficiamento do minério de ferro, e o outro material estéril, também proveniente da exploração de tal minério. Ambos se encontravam em depósitos próprios para a suas disposições.

Nestes depósitos foram feitos furos de sondagem com ensaios SPT, e também foram coletadas amostras deformadas para a realização de ensaios de resistência em laboratório com corpos de prova remoldados com as mesmas condições de densidades secas encontradas em campo.

Para a caracterização dos materiais supracitados e definições dos parâmetros de moldagem dos corpos de prova, foram realizados, respectivamente, ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação conforme a norma ABNT NBR 7181:1984 e ensaios de densidade in situ com a utilização do fraco de areia com as recomendações da norma ABNT NBR 7185:1986. Os resultados obtidos serão apresentados adiante.

2.2 Ensaios triaxiais CU_{sat}

O ensaio de compressão triaxial é um dos mais confiáveis métodos disponíveis para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (Das, 2007). Com isso, neste estudo o mesmo foi utilizado como referência para verificação e validação de parâmetros obtidos através de correlações com o ensaio SPT.

Os ensaios triaxiais convencionais consistem na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico do solo (Pinto, 2006). Dentre estes ensaios existem, basicamente, três tipos mais comuns, no que se refere às

condições de adensamento e drenagem, sendo eles o não adensado e não drenado (UU), o adensado drenado (CD) e, no caso dos ensaios utilizados neste trabalho, o adensado e não drenado (CIU). A fase de adensamento, quando realizada, ocorre antes do início da ruptura (cisalhamento), sendo que esta pode ser feita com o sistema drenante (medindo-se as variações volumétricas durante esta fase) ou com o sistema fechado, impossibilitando a drenagem e permitindo o monitoramento do desenvolvimento de poropressão durante a ruptura.

Segundo Ortigão (2007), em geral, o ensaio é conduzido em duas fases: na primeira, aplica-se uma tensão confinante σ_c isotrópica e, na segunda, denominada fase de cisalhamento, mantém-se constante o valor de σ_c e aumenta-se o valor da tensão axial σ_1 , através da aplicação da tensão-desvio ou desviatória $\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3$.

Devido à não existência de normas brasileiras relativas aos procedimentos de execução do ensaio triaxial, foi utilizada como base a norma americana ASTM D4767-11, a qual determina os métodos para a execução do ensaio triaxial CIU.

A Figura 1 mostra um croqui esquemático do ensaio triaxial.

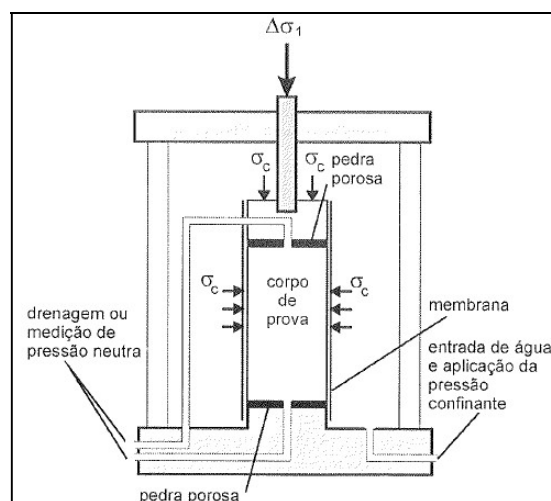


Figura 1. Esquema do ensaio triaxial. Fonte: Pinto, 2006.



Para a definição dos parâmetros dos materiais ensaiados utilizou-se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, tomando-se como base a tensão máxima desviatória de cada corpo de prova que caracteriza sua ruptura.

Segundo Almeida (2010), no critério de ruptura de Mohr-Coulomb, a resistência ao cisalhamento t na iminência da ruptura é determinada pela Equação 1, a qual pode ser representada por um diagrama como mostrado pela Figura 2.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

Onde c é a coesão e ϕ é o ângulo de atrito do solo.

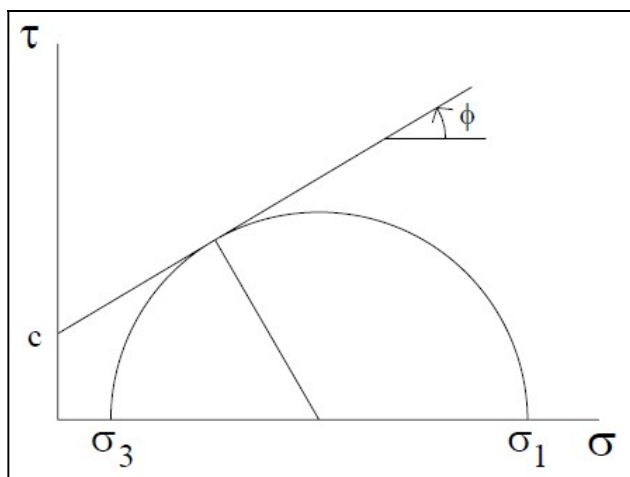


Figura 2. Critério de escoamento Mohr-Coulomb no plano (σ, τ) . Fonte: Almeida, 2010.

Ainda segundo Almeida (2010), o conceito de círculo de Mohr pode ser utilizado para expressar a função de escoamento F , representada pela Equação 2 (ou de plastificação) em termos das tensões principais σ_1 e σ_3 , respectivamente, a tensão principal maior e a tensão principal menor.

$$F = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \tan \phi - c \cos \phi \quad (2)$$

A partir disso, com os círculos de Mohr definidos para cada corpo de prova, por meio das tensões σ_1 e σ_3 obtidas na ruptura (máxima desviatória), define-se os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, pelo intercepto da envoltória com o eixo τ e com a inclinação da mesma, respectivamente.

Porém, de acordo com Pinto (2006), quando as duas tensões principais variam simultaneamente, a representação gráfica pelos Círculos de Mohr pode se tornar confusa. Diante disso, criou-se a sistemática de representar as diversas fases de carregamento pela representação exclusiva dos pontos (de maior ordenada de cada círculo). Esta representação gráfica, exemplificada na Figura 3, é denominada trajetória de tensões ou trajetória de tensões efetivas (quando se desconta o valor da poropressão, representado por: $'$), onde os eixos são definidos pelas Equações 3 e 4 a seguir.

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (3)$$

$$q' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (4)$$

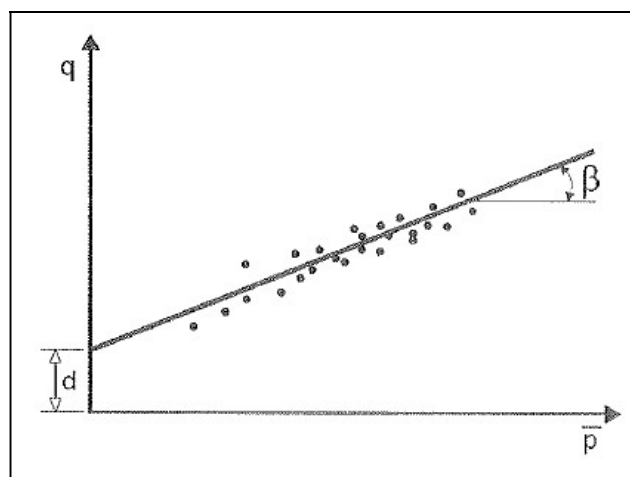


Figura 3. Exemplo de trajetória de tensões efetivas. Fonte: Pinto, 2006.



Neste caso, o qual será utilizado neste trabalho, os parâmetros de resistência são definidos pelas equações 5 e 6, as quais relacionam o a inclinação da reta do gráfico com o ângulo de atrito e o intercepto no eixo “q” com a coesão, respectivamente:

$$\text{sen}\phi = \tan \beta \quad (5)$$

$$c = \frac{d}{\cos \phi} \quad (6)$$

2.2 O ensaio SPT e a correlação com os parâmetros de resistência

Os ensaios SPT (Standard Penetration Test), são realizados comumente nas sondagens a percussão e, segundo a ABNT NBR 6484, têm como finalidade determinar os tipos de solo em suas respectivas profundidades de ocorrência, a posição do nível d’água e os índices de resistência à penetração (N) a cada metro. Ainda segundo a norma, “N” é a abreviatura do índice de resistência à penetração do SPT, cuja determinação se dá pelo número de golpes correspondente à cravação de 30 cm do amostrador padrão, após a cravação inicial de 15 cm, utilizando-se corda de sisal para levantamento do martelo padronizado. A norma brasileira ainda traz todo o procedimento executivo e especificações do equipamento que deve ser utilizado neste tipo de ensaio de campo.

Há, na literatura técnica, diversas correlações empíricas para determinação de parâmetros do solo através do resultado dos ensaios SPT. Contudo as eficiências, segundo Quaresma et al.(1998), conforme esse ensaio é executado nos diversos locais do mundo, podem variar de cerca de três vezes, sendo que os valores de N variam com o inverso da eficiência. Com isso, ainda segundo Quaresma et al.(1998), recomenda-se que as eficiências dos diversos SPT sejam convertidas para 60%,

uma espécie de padrão de referência internacional, sendo o valor de N padronizado com tal eficiência designado por $(N_1)_{60}$.

Para o cálculo do $(N_1)_{60}$ deve-se conhecer a eficiência do ensaio e o coeficiente CN, o qual é dado pela equação 7. A eficiência do ensaio brasileiro, e que será considerada neste trabalho, é de 72%, segundo Quaresma et al.(1998). Com isso, para obtenção de N_{60} basta multiplicar o N obtido no ensaio por 1,2, ou seja, 72/60.

$$C_N = \sqrt{\frac{(\sigma'_{v0})_1}{(\sigma'_{v0})}} \quad (7)$$

Onde:

- $(\sigma'_{v0})_1$ é a pressão atmosférica, aqui considerada 98 kPa, para se assimilar à correlação do estudo utilizado e descrita adiante;
- (σ'_{v0}) é a tensão efetiva correspondente ao nível/profundidade onde o ensaio está sendo executado.

Com isso, obtém-se N_1 e $(N_1)_{60}$ pelas equações 8 e 9, respectivamente.

$$N_1 = C_N \cdot N \quad (8)$$

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot N_{60} \quad (9)$$

Com estes dados obtidos com base nos resultados dos ensaios SPT, pode-se utilizar das diversas correlações para obtenção dos parâmetros de resistência. Neste trabalho, foi utilizada a correlação proposta por Hatanaka & Uchida (1996). Este estudo foi escolhido por ter sido feito com dados de ensaios triaxiais e sondagens SPT realizados em areias, as quais, pelos valores de SPT possuem similaridade às utilizadas no presente trabalho.



Após a análise dos triaxiais e das sondagens, Hatakana & Uchida (1996) definiram a correlação mostrada na equação 10.

$$\phi = (20.N_1)^{0.5} + 20^\circ \quad (10)$$

Nota-se que os autores utilizaram o N normalizado (N_1) para definição de sua correlação, e não o citado anteriormente como referência internacional denominado $(N_1)_{60}$. Contudo, é citado no artigo que a eficiência do equipamento utilizado para os ensaios SPT é de 78%, dado ter sido utilizado o equipamento denominado trip monkey, o qual possui as características apresentadas na Tabela 1. É importante notar a similaridade com o equipamento padrão brasileiro, normatizado pela ABNT NBR 6484.

Tabela 1. Especificações do SPT (Hatanaka & Uchida, 1996, modificado).

Parte	Item	Valor
Martelo	Peso (kgf)	63,5
	Altura de queda (cm)	75
Haste	Diâmetro (mm)	40,5
Amostrador	Diâmetro externo (mm)	51
	Diâmetro interno (mm)	35

Com isso, considerando-se a eficiência do equipamento de 78% na definição da correlação a ser utilizada no presente trabalho, a equação 10 foi corrigida para utilização do valor de N de referência internacional $(N_1)_{60}$ obtendo-se a equação 11.

$$\phi = (15,4.(N_1)_{60})^{0.5} + 20^\circ \quad (11)$$

3 RESULTADOS

Como citado anteriormente, os materiais utilizados são de natureza arenosa, como mostrado nos ensaios de granulometria realizados e mostrados na sequencia. A Figura 4

mostra a curva granulométrica do rejeito, material com percentual de finos (menores que 0,074 mm) elevado, sendo este, cerca de 80% da composição desta amostra. Já a Figura 5 mostra a curva obtida nos ensaios para o material estéril, sendo que o mesmo também apresenta cerca de 80% de materiais considerados finos, porém apresentou cerca de 7% de materiais mais grosseiros (areia média à pedregulhos), os quais não foram encontrados no rejeito. Na Tabela 2 são apresentados as densidades secas obtidas nos ensaios de campo e o resumo geral dos ensaios de granulometria com as texturas obtidas.

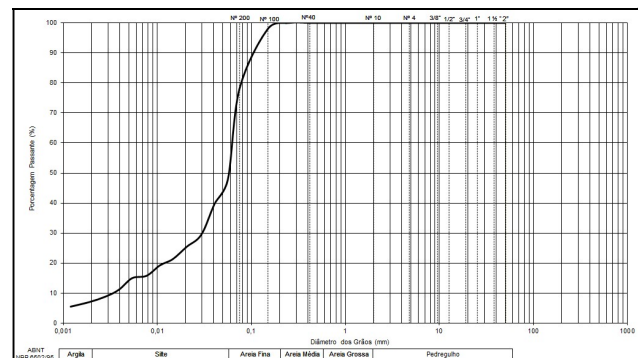


Figura 4. Curva granulométrica do rejeito.

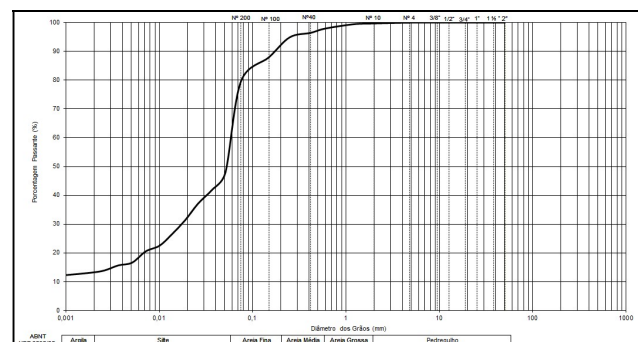


Figura 5. Curva granulométrica do estéril.



Tabela 2. Resumo dos ensaios de granulometria e resultados dos ensaios de densidade in situ.

Material	Densidade seca in situ (kN/m ³)	Texturas (ABNT NBR 6502:1995)					
		Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
Rejeito	23,6	7,25	46,59	45,95	0,21	0,00	0,00
Estéril	25,1	12,0	41,0	40,0	5,0	1,0	1,0

Os ensaios triaxiais apresentaram resultados dentro do esperado para as características físicas dos materiais com ângulos de atrito elevados, por se tratarem de materiais com alto teor de areia, e coesões baixas ou nulas, devido ao baixo percentual de argila, principalmente se comparado com a quantidade de areia presente nas amostras. Ressalta-se que, no caso deste trabalho, os materiais são materiais compactados em laboratório, portanto não apresentam estruturas como a maioria dos materiais provenientes de terrenos naturais e amostras indeformadas. Nestes casos, a caracterização granulométrica do material deve ser usada apenas como referência, dado que as estruturas podem ocasionar comportamentos com relação à resistência distintos aos que podem ser supostos com as texturas apenas.

Os parâmetros de resistência foram calculados com base na trajetória de tensões efetivas como citado anteriormente. É importante deixar claro que o cálculo feito com o auxílio dos círculos de Mohr, desde que também considerem os mesmos pontos de ruptura, no caso a máxima tensão desviadora, também apresentam os mesmos resultados. Na Figura 6 é apresentado o gráfico das trajetórias de tensões efetivas para o Rejeito, enquanto na

Figura 7 é apresentado o gráfico do Estéril. Nota-se certa similaridade nos comportamentos de ambos os materiais, o que já era esperado devido às suas características físicas, com a mesma resslava do parágrafo anterior. Na Tabela 3 é mostrado o resumo dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais.

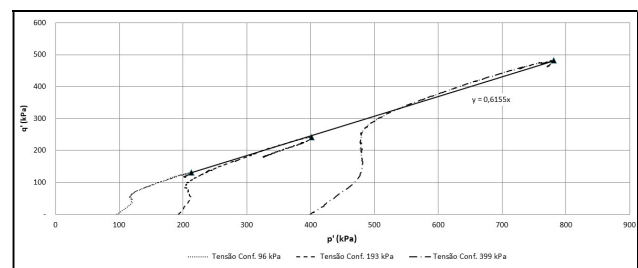


Figura 1: Trajetória de tensões efetivas ($q'xp'$) para o material denominado Rejeito.

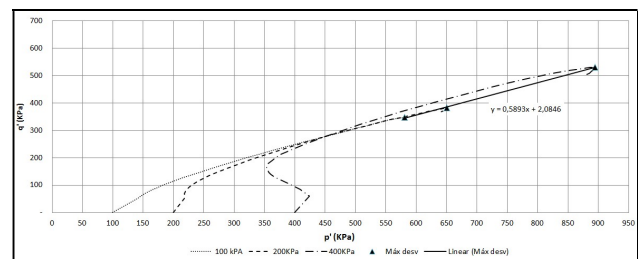


Figura 2: Trajetória de tensões efetivas ($q'xp'$) para o material denominado Estéril.

Tabela 3. Resumo dos ensaios triaxiais.

Material	Parâmetros de resistência efetivos	
	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Rejeito	0,0	38,0
Estéril	2,6	36,1

Foram realizadas três sondagens à percussão e com ensaios SPT nos materiais estudados, sendo duas sondagens no rejeito com profundidades de 4,00 e 7,00 m, e uma sondagem no material denominado estéril com 15,0 m de profundidade. Estas sondagens foram feitas diretamente nos depósitos onde estes materiais se encontravam estocados, já consolidados e drenados.

Com a obtenção dos valores de N_{SPT} foi possível utilizar a correlação citada



anteriormente para definição dos ângulos de atrito destes materiais de forma empírica. Para estes cálculos foram utilizadas densidades estimadas para o rejeito e para o estéril, sendo elas de 23,0 e 25,0 kN/m³ respectivamente.

Os valores obtidos para os ângulos de atrito efetivos foram dentro do esperado para o tipo de material, e menores que os obtidos nos ensaios triaxiais. Segundo Hatanaka & Uchida (1996) o ângulo de atrito para os ensaios triaxiais é bem maior que os estimados a partir de proposições empíricas.

As tabelas 4, 5 e 6 apresentam os resultados obtidos através das correlações, e a tabela 7 mostra um resumo dos resultados sendo apresentados os resultados mínimo, médio e máximo para cada material estudado. Nota-se que os valores máximos são destoantes dos demais e afastados da média, o que reforça a afirmação de Hatanaka & Uchida (1996).

Tabela 1: Correlação para obtenção do ângulo de atrito pelo NSPT – Rejeito – Sondagem 01

Profundidade (m)		N _{SPT}	σ'_{v0} (kPa)	C _N Para areias	N ₆₀	(N ₁) ₆₀	ϕ' (Hatanaka e Uchida, 1996) Para areias
Início	Fim						
1,00	1,45	4	21,0	2,2	4,8	10,4	32,6
2,00	2,45	5	42,0	1,5	6,0	9,2	31,9
3,00	3,45	7	63,0	1,2	8,4	10,5	32,7
4,00	4,45	19	84,0	1,1	22,8	24,6	39,5

Tabela 2: Correlação para obtenção do ângulo de atrito pelo NSPT – Rejeito – Sondagem 02

Profundidade (m)		N _{SPT}	σ'_{v0} (kPa)	C _N Para areias	N ₆₀	(N ₁) ₆₀	ϕ' (Hatanaka e Uchida, 1996) Para areias
Início	Fim						
1,00	1,45	1	23,0	2,1	1,2	2,5	26,2
2,00	2,45	7	46,0	1,5	8,4	12,3	33,7
3,00	3,45	1	69,0	1,2	1,2	1,4	24,7
4,00	4,45	0	92,0	1,0	0,0	0,0	20,0
5,00	5,45	3	115,0	0,9	3,6	3,3	27,2
6,00	6,45	4	138,0	0,8	4,8	4,0	27,9
7,00	7,45	6	161,0	0,8	7,2	5,6	29,3



Tabela 3: Correlação para obtenção do ângulo de atrito pelo NSPT – Estéril – Sondagem 01

Profundidade (m)		N_{SPT}	σ'_{v0} (kPa)	C_N para areias	N_{60}	$(N_1)_{60}$	ϕ' (Hatanaka e Uchida, 1996) para areias
Início	Fim						
1,00	1,45	8	25,0	2,0	9,6	19,0	37,1
2,00	2,45	8	50,0	1,4	9,6	13,4	34,4
3,00	3,45	8	75,0	1,1	9,6	11,0	33,0
4,00	4,45	7	100,0	1,0	8,4	8,3	31,3
5,00	5,45	9	125,0	0,9	10,8	9,6	32,1
6,00	6,45	7	150,0	0,8	8,4	6,8	30,2
7,00	7,45	10	175,0	0,7	12,0	9,0	31,8
8,00	8,45	10	200,0	0,7	12,0	8,4	31,4
9,00	9,45	9	225,0	0,7	10,8	7,1	30,5
10,00	10,45	7	250,0	0,6	8,4	5,3	29,0
11,00	11,45	8	275,0	0,6	9,6	5,7	29,4
12,00	12,45	10	300,0	0,6	12,0	6,9	30,3
13,00	13,45	13	325,0	0,5	15,6	8,6	31,5
14,00	14,45	16	350,0	0,5	19,2	10,2	32,5
15,00	15,45	18	375,0	0,5	21,6	11,0	33,0

Tabela 4: Resumo dos ensaios triaxiais

Material	Ângulos de atrito, em °, obtidos através dos ensaios SPT's		
	Mínimo	Médio	Máximo
Rejeito	20,0	29,6	39,5
Estéril	29,0	31,8	37,1

4 CONCLUSÕES

Para os materiais estudados neste trabalho, notou-se que as correlações, como já esperado, apresentaram valores de ângulos de atrito efetivos menores do que os obtidos em ensaios triaxiais. É importante destacar que existem inúmeras correlações na literatura, as quais podem apresentara resultados distintos, dado que cada estudo trata um tipo de material bem como origens e formações diversas.

A utilização de correlações empíricas como a aqui utilizada, desde que para o material adequado e com certa similaridade física e mecânica ao material utilizado para definição das mesmas, apresenta, neste caso, uma maior segurança quando se trata de materiais que não possuem coesão, ou seja, materiais arenosos ou areno siltosos com ausência de tal parâmetro. Esta segurança pode ser refletida em projetos de estruturas, principalmente em se tratando de projetos em fases de viabilidade e/ou de conceituação, ou seja, projetos básicos ou conceituais. Isso por que para projetos executivos de estruturas geotécnicas é sempre recomendável a realização de investigações detalhadas de todos os materiais envolvidos.

Com isso, as correlações com o SPT podem ser uma boa saída economicamente viável para os projetos supracitados, sendo que, em casos como o aqui apresentado, mostram que são capazes de estimas parâmetros dentro de uma faixa de segurança aceitável, porém sem destoar de parâmetros mais refinados como os obtidos com os ensaios triaxiais.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6484:2001. Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio
- ABNT NBR 7181:1984. Solo – Análise granulométrica.
- ABNT NBR 7185:1986. Solo – Determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia
- Almeida, Marínis Maria de. Estudo tensão deformação de barragem de terra e enrocamento [manuscrito] / Marínis Maria de Almeida - 2010. Dissertação



- (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. NUGEO.
- ASTM D4767-11. (2011). Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.
- DAS, B.M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Tradução All Tasks. São Paulo. Thomson Learning. 2007.
- HATANAKA, M., UCHIDA, A., 1996. Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils. Soils and foundations, Vol. 36, No. 4, 1-9, Dec. 1996. Japanese Geotechnical Society.
- ORTIGÃO, J.A.R. 2007. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. Terratek. 3ª edição.
- PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas / 3ª edição. Carlos de Sousa Pinto – São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- QUARESMA, A. R. et al. Investigações Geotécnicas. In: HACHICH, W., et al. FUNDAÇÕES: Teoria e Prática. 2ª. Ed. São Paulo: PINI, 1998. Cap. 3.