

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/538

## Estudo comparativo entre a obtenção de ângulo de atrito ( $\phi$ ) para um parque solar por meio de correlações de SPT e cisalhamento direto

Lucas Quiocca Zampieri

Engenheiro Civil, Araxá Engenharia, Florianópolis, Brasil, lqzampieri@gmail.com

Gracieli Dienstmann

Professora, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, g.dienstmann@ufsc.br

José Carlos Bressan Júnior

Engenheiro Civil, Araxá Engenharia, Florianópolis, Brasil, jose.cbrssan@gmail.com

Alysson Rodrigues Marques Gomes Assis

Engenheiro Civil, Araxá Engenharia, Florianópolis, Brasil, alyssondeassis@gmail.com

**RESUMO:** A resistência a cisalhamento do solo define-se como a tensão cisalhante que ocorre em uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo. Os parâmetros de resistência do solo podem ser obtidos de maneira direta em laboratório por meio de ensaio de cisalhamento direto ou triaxial. Ensaio de campo, como o SPT, podem ser utilizados para estimativa dos parâmetros, utilizando diferentes correlações propostas em literatura. Este trabalho objetiva avaliar a aplicação entre métodos de estimativa dos parâmetros por meio do SPT (5 autores) e ensaio de laboratório (cisalhamento direto), os dados apresentados são de uma campanha de investigação geotécnica para instalação de um parque fotovoltaico, na região nordeste do Brasil. Avaliam-se 25 pontos de ensaios com sondagem SPT na profundidade de 1,0 m e resultados de cisalhamento direto na mesma cota. A análise dos valores confirma as distribuições e valores de Cov condizentes com a literatura e as médias das correlações e cisalhamento direto apresentam variabilidade principalmente para baixos valores de SPT. Assim, conclui-se que, para o solo da região avaliada a 1,0 m de profundidade, é possível utilizar a correlação com certo grau de assertividade e cuidados, valendo-se sempre da avaliação do profissional e análise de confiabilidade dos dados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Investigação geotécnica, Parâmetros de Resistência, SPT, Cisalhamento Direto.

**ABSTRACT:** Soil shear resistance is defined as the shear stress that occurs on a continuous shear surface within the soil mass. Soil resistance parameters can be directly obtained in the laboratory through direct shear or triaxial testing. Field tests, such as SPT, can be used to estimate parameters using different correlations proposed in the literature. This study aims to evaluate the application of methods for estimating parameters through SPT (5 authors) and laboratory testing (direct shear), with data from a geotechnical investigation campaign for the installation of a photovoltaic park in the northeastern region of Brazil. Twenty-five test points with SPT sounding at a depth of 1.0 m and direct shear results at the same level are evaluated. The analysis of the values confirms distributions and Cov values consistent with the literature, and the averages of correlations and direct shear show variability mainly for low SPT values. Thus, it is concluded that, for the soil in the evaluated region at a depth of 1.0 m, it is possible to use the correlation with a certain degree of assertiveness and caution, always relying on professional evaluation and data reliability analysis.

**KEYWORDS:** Geotechnical Investigation, Resistance Parameters, SPT, Direct Shear.

## 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são em grande parte impulsionadas pela emissão de gases de efeito estufa resultantes da exploração de fontes de energia como petróleo, gás natural e carvão. Entretanto, a exploração desses recursos ainda domina o mercado energético. a energia nuclear surge como uma alternativa de baixa emissão de carbono, embora esteja sujeita a preocupações relacionadas à segurança e ao gerenciamento de resíduos (FIGUEIREDO, 2021).

Nesse cenário, a demanda por energia limpa tem se intensificado e movimentando o mercado de energia, levando os tradicionais combustíveis fósseis a um papel secundário e impulsionando investimentos em usinas fotovoltaicas (BEZERRA, 2023). De acordo com os dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica - ABSOLAR (2024), já são mais de 37,2 GW operacionais no Brasil, correspondendo a 16,5% da matriz energética do país, ficando atrás apenas da fonte hídrica, tendo uma estimativa de 44,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas.

Os processos executivos essenciais para a concepção de uma usina incluem as investigações geológico/geotécnicas, levantamento topográfico, instalação de suportes para os módulos fotovoltaicos, a remoção parcial da vegetação, movimentação de solo, a distribuição do sistema de drenagem e os acessos internos. As fundações e movimentações de terra são elementos fundamentais para o bom desempenho da obra, logo, os parâmetros do solo são essenciais para os dimensionamentos e tomadas de decisão. Visando o melhor desempenho dos projetos, é preciso ter confiança nos dados de entrada, qualidade nos processos de desenvolvimento e boa acurácia. Logo, uma boa campanha de investigação geotécnica pode minimizar as chances de erros e potencializar os bons resultados.

### 1.1 Ensaio de Cisalhamento Direto

De acordo com a ASTM D8030M (2023), o ensaio de cisalhamento direto consiste em submeter um corpo de prova (CP) ao cisalhamento através de um plano pré-determinado. Para tanto, inicialmente é aplicada uma carga normal predeterminada, sob a qual o CP é consolidado. Na sequência aplica-se o cisalhamento deslocando uma metade da caixa de cisalhamento lateralmente em relação à outra a uma taxa constante de deformação por cisalhamento. Nessa etapa é medida a força de cisalhamento, o deslocamento lateral relativo e o deslocamento vertical.

O ensaio de cisalhamento direto, conforme Lambe e Whitman (1969), é a forma mais antiga para determinação de parâmetros de resistência, utilizado pela primeira vez por Coulomb em 1776.

O ensaio de cisalhamento direto é uma forma conveniente de testar areia, vários testes dessa natureza podem ser conduzidos variando a carga normal. O ângulo de atrito das areias, de acordo com o autor, geralmente varia de 26° a 45°, aumentando com a densidade relativa de compactação. Em geral, o ensaio de cisalhamento direto proporciona um ângulo de atrito mais elevado em comparação com o obtido pelo ensaio triaxial (DAS, 2012).

Com relação a envoltória, Das (2012) afirma que para um solo específico a envoltória não seria reta e sim, na realidade, curva. Portanto, o critério de falha de Mohr-Coulomb é na verdade apenas uma aproximação. Além disso, a ASTM D8030M (2023), ainda cita que existem algumas limitações no teste, como a não uniformidade das tensões cisalhantes no plano de falha e a possibilidade de não uniformidade do plano de falha devido a irregularidades dentro do solo e forças aplicadas

### 1.2 Correlações com SPT

Conforme a NBR 6484 (2020), o Standard Penetration Test (SPT) é o ensaio para determinação do Índice de Resistência à Penetração “N”, determinado pelo número de golpes correspondente à cravação de 30 cm do amostrador-padrão, após a cravação inicial de 15 cm, utilizando-se martelo de 65 kg de massa. O ensaio envolve a perfuração e cravação dinâmica de um amostrador-padrão a cada metro. A partir da amostra de solo retirada, é possível realizar a análise tátil visual e classificação granulométrica, além de ensaios de teor de umidade, entre outros. Como resultado do ensaio tem-se a caracterização do perfil estratigráfico (tipo

de solo), em conjunto com a obtenção de um índice de resistência. Ainda, a partir da observação da surgência de água é possível definir de forma direta o nível da água do terreno.

As vantagens desse ensaio em relação aos demais são: simplicidade do equipamento, baixo custo e obtenção de um valor numérico de ensaio que pode ser relacionado por meio de propostas não sofisticadas, mas diretas, com regras empíricas de projeto. O ensaio de SPT é utilizado em diversas aplicações, desde a amostragem para identificação de horizontes até a previsão da tensão admissível de fundações. Correlações empíricas, embora inicialmente limitadas a condições específicas, são frequentemente extrapoladas na prática, nem sempre de maneira apropriada (SCHNAID, ODEBRECH, 2012).

O SPT é utilizado com frequência na prática brasileira de engenharia para a obtenção de parâmetros constitutivos a serem adotados em projetos geotécnicos. Para determinação Sabendo-se que o  $N_{SPT}$  fornece uma medida de resistência, é prática comum estabelecer correlações entre o  $N_{SPT}$  e o ângulo de atrito interno do solo ( $\phi'$ ). A Tabela 1 apresenta correlações de diferentes autores para estimativa do parâmetro de ângulo de atrito para solos granulares. Para facilitar a apresentação, neste artigo serão nomeadas as correlações dos 5 autores com letras de A até E, conforme consta na Tabela 1.

**Tabela 1. Correlação para obtenção de ângulo de atrito a partir dos dados de SPT**

Correlação	Equações	Autor(es)
A	$\phi'p \sim 15^\circ + \sqrt{24 \times N_{SPT}}$	Teixeira (1996) <sup>1</sup>
B	$\phi'p \sim 20^\circ + \sqrt{15,5 \times N_{SPT,60}}$	Hatanaka e Uchida (1996) <sup>1</sup>
C	$\phi' \sim 27,1^\circ + 0,3N_{60} - 0,00054N_{60}^2$	Peck, Hanson, and Thornburn (1974) <sup>2</sup>
D	$\phi' \sim 28^\circ + 0,4N_{SPT}$	Godoy (1983) <sup>3</sup>
E	$\phi' \sim 27,5^\circ + 9,2\log N_{60}$	Kulhawy and Chen (2007) <sup>4</sup>

<sup>1</sup> - Schnaid e Odebrech (2012)

<sup>2</sup> - Das (2012)

<sup>3</sup> - Cintra, Aoki e Albiero (2011)

<sup>4</sup> - Sivakugan (2021)

## 1.2 Análise estatística

### 1.2.1 Coeficiente de Variação (Cov)

Conforme consta em Barbetta, Reis e Bornia (2010) o coeficiente de variação (Cov) é adimensional, e se torna útil quando é necessário comparar a variabilidade de observações com diferentes unidades de medidas. Sendo uma medida estatística adimensional que expressa a variabilidade de uma amostra como uma porcentagem da média, calculada por:

$$Cov = \left(\frac{s}{\bar{X}}\right) - \text{onde } s \text{ é o desvio padrão amostral e } \bar{X} \text{ é a média amostral.}$$

De acordo Phoon e Kulhawy (1999), a maioria dos Covs relatados na literatura geotécnica baseia-se em análises de variabilidade total, os Covs podem ser consideravelmente maiores do que a variabilidade inerente real do solo devido a quatro problemas potenciais: (i) os dados do solo de diferentes unidades geológicas são misturados, (ii) os controles de equipamentos e procedimentos geralmente são insuficientes, (iii) tendências determinísticas nos dados do solo não são removidas e (iv) os dados do solo são coletados ao longo de um longo período de tempo.

Na literatura, para ângulo de atrito, indica-se em Lacasse e Nadim (1998) e Kulhawy e Phoon (2008) *apud* Phoon (2015), valores de Cov variando de 2 a 13% e 5 e 10% respectivamente, válido para ensaios e medições a partir de ensaios de campo ou laboratório de boa qualidade. Já os valores provenientes das correlações Kulhawy e Phoon (2008) *apud* Phoon (2015) indicam Cov de 15 a 20 para correlações indiretas com dados de SPT.

### 1.2.2 Análise de dados pareados e Wilcoxon-Mann-Whitney

De acordo com Barbetta, Reis e Bornia (2010), o chamado teste t de dados pareados é apropriado para comparar dois conjuntos de dados quantitativos, em termos de seus valores médios. Mais especificamente:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 \text{ e } H_1 = \mu_1 \neq \mu_2$$

Onde:  $\mu_1$  é o valor esperado da resposta sob a amostra 1 e  $\mu_2$  é o valor esperado da resposta sob a amostra 2.

Esse teste permite ao usuário estimar o tamanho do efeito e testar a hipótese nula de que a média populacional da diferença entre observações pareadas é igual a 0

O Intervalo de confiança para o parâmetro de localização, que por padrão, é definido como 95%. No entanto, isso pode ser alterado para a porcentagem desejada.

O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney é usado para comparar a posição central de duas populações, com base em amostras independentes, extraídas aleatoriamente dessas populações. Os dados das duas amostras independentes são gerados por populações com distribuições contínuas, embora as variáveis não precisem ser observadas diretamente; pode ser observado apenas uma ordenação dos elementos. Sejam  $\eta_1$  a mediana da população 1 e  $\eta_2$  a mediana da população 2 (Barbetta; Reis; Bornia, 2010). As hipóteses podem ser colocadas como:

$$H_0 = \eta_1 = \eta_2 \text{ e } H_1 = \eta_1 \neq \eta_2$$

Barbetta, Reis e Bornia (2010), informam que a hipótese nula do teste é de que não há diferença entre as posições centrais das duas populações. Sob essa hipótese, as somas dos postos referentes às duas amostras devem apresentar resultados aproximadamente iguais. Se for verificado u distante do valor esperado por  $H_0$ , há indícios para rejeitar  $H_0$  (considerando a hipótese alternativa e o nível de significância do teste). Esses testes são comumente usados para comparar as médias de duas amostras pareadas quando os dados não atendem aos pressupostos de normalidade.

O valor-p indica a probabilidade de obter os resultados observados ou mais extremos, sob a hipótese nula de que não há diferença entre as medidas. Interpreta-se que um valor-p menor que o nível de significância escolhido (geralmente 0.05) sugere que há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula. Um valor-p maior que o nível de significância sugere que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo apresentado neste artigo trabalha com os dados de uma campanha geotécnica realizada em um projeto para implantação de uma usina fotovoltaica na região nordeste do Brasil. Conforme consta no CPRM (2010), as condições geológico-geotécnicas que ocorrem na área de implantação do parque são predominantemente constituídas por 3 formações geológicas: Formação Jandaíra (área norte); Formação Açú (área central e norte); e Formação Barreiras (área sul).

A Figura 1 apresenta a localização dos pontos ensaiados e também as formações geológicas presentes dentro da área de estudo. Ao todo, para a obra, foram coletadas 51 amostras deformadas em campo, todas elas analisadas em laboratório para ensaios de caracterização completa (granulometria, densidade dos grãos, índices de consistência, etc.). Adicionalmente, foram coletadas amostras indeformadas a 1,0 m de profundidade em relação ao nível do terreno e executados ensaios de Cisalhamento Direto (laboratório) para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo em 25 amostras (todas arenosas).

Como evidenciado na Figura 1, a predominância granulométrica observada na classificação do solo é composto por frações de areia. A Tabela 2 apresenta os resultados dos 25 pontos de ensaios trabalhados neste artigo, ressalta-se que os valores de SPT são para a profundidade de 1,0 m, assim como a profundidade de coleta dos materiais para ensaios de laboratório.



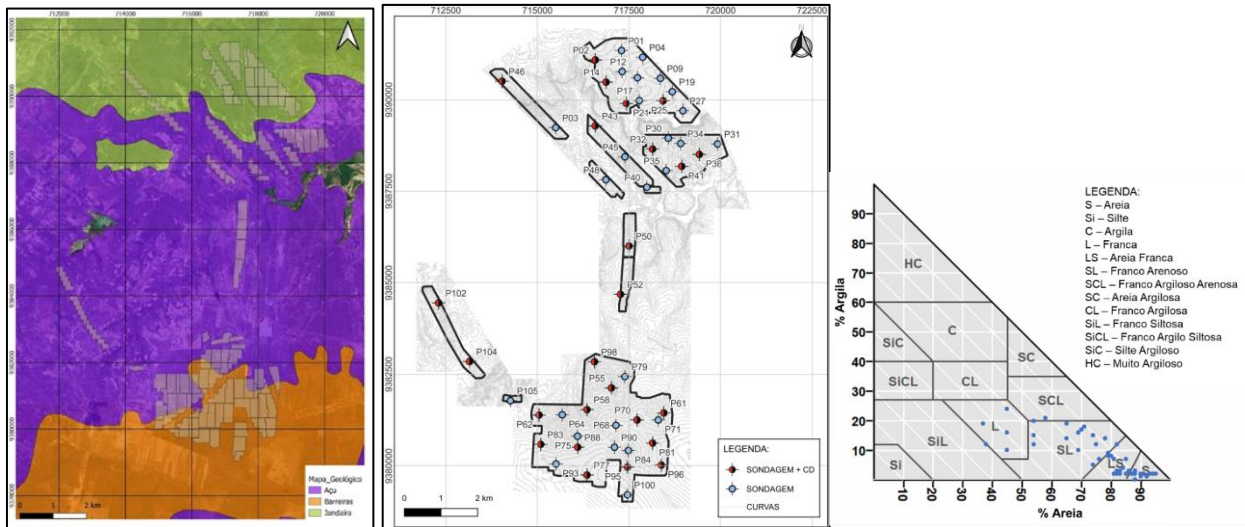


Figura 1. Mapa geológico, localização dos pontos de ensaio e classificação dos solos na região de estudo

Tabela 2. Resultados SPT e ângulo de atrito do solo

PONTO	SPT	$\phi$ (°)	Compacidade NBR 6484	PONTO	SPT	$\phi$ (°)	Compacidade NBR 6484
P01	17	35,4	Medianamente Compacta	P14	18	39,4	Medianamente Compacta
P02	50	43,7	Muito Compacta	P15	7	40,3	Pouco Compacta
P03	50	43,8	Muito Compacta	P16	11	37,7	Medianamente Compacta
P04	26	35,2	Compacta	P17	11	37,0	Medianamente Compacta
P05	34	35,9	Compacta	P18	14	32,8	Medianamente Compacta
P06	50	42,7	Muito Compacta	P19	14	34,6	Medianamente Compacta
P07	20	36,9	Compacta	P20	27	41,3	Compacta
P08	29	34,9	Compacta	P21	13	35,8	Medianamente Compacta
P09	27	36,3	Compacta	P22	12	37,9	Medianamente Compacta
P10	9	39,0	Medianamente Compacta	P23	10	40,5	Medianamente Compacta
P11	35	38,9	Compacta	P24	16	37,0	Medianamente Compacta
P12	11	41,0	Medianamente Compacta	P25	29	40,3	Compacta
P13	14	40,0	Medianamente Compacta				

A Figura 2 apresenta o histograma de distribuição dos valores de SPT e ângulo de atrito. Percebe-se uma distribuição com maior incidência de valores baixos para o SPT o que poderia aproximar o comportamento a uma distribuição log-normal (Figura 2a). Enquanto que para o ângulo de atrito tem uma maior quantidade de números intermediários, distribuição próxima a média o que poderia indicar uma tendência a distribuição normal (Figura 2b).

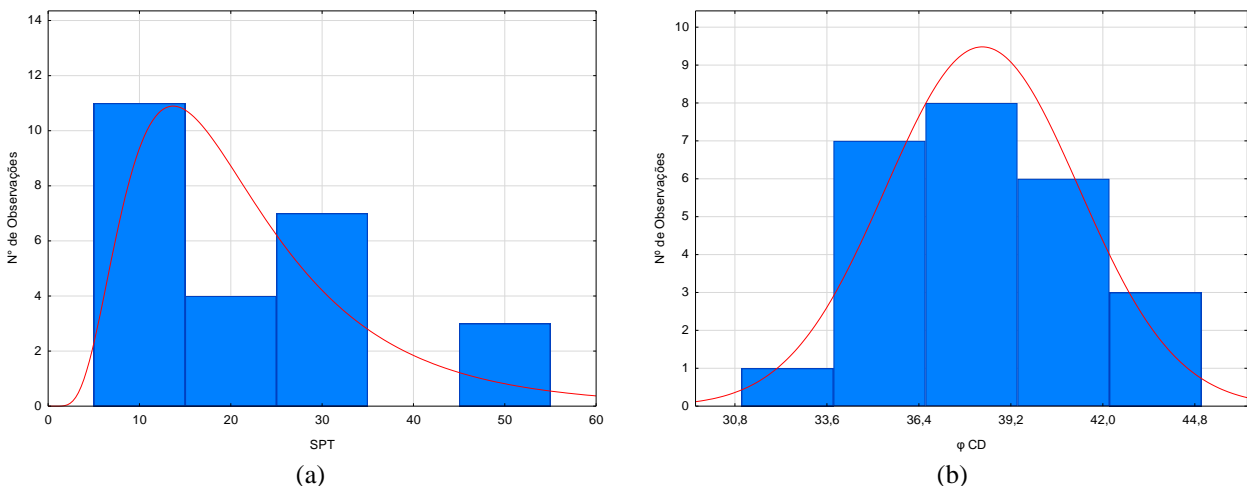


Figura 2. Histograma de distribuição dos valores de SPT (a) e distribuição do ângulo de atrito (b)

Para se obter os valores de ângulo de atrito por meio de correlações com o SPT foram todos as equações apresentadas na Tabela 1 e os valores de SPT para o primeiro metro conforme descrito na Tabela 2.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Toma-se como base os resultados de campo e laboratório apresentados na Tabela 2, assumiu-se o valor apresentado para o ângulo de atrito e as correlações da Tabela 1 para obtenção do ângulo de atrito a partir dos números das sondagens SPT, todos correspondentes a amostras de solo granular e em uma profundidade de 1,0 m. A Tabela 3 apresenta os resultados das correlações para obtenção dos valores de ângulo de atrito do solo com os valores de SPT. As letras de A até E indicam as correlações conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 3. Resultado das correlações

PONTO	SPT	$\phi_{CD}$ (°)	$\phi_A$	$\phi_B$	$\phi_C$	$\phi_D$	$\phi_E$	PONTO	SPT	$\phi_{CD}$ (°)	$\phi_A$	$\phi_B$	$\phi_C$	$\phi_D$	$\phi_E$
P01	17	35,4	35,2	37,8	33,2	34,8	39,5	P14	18	39,4	35,8	38,3	33,6	35,2	39,8
P02	50	43,7	49,6	50,5	45,1	48,0	43,9	P15	7	40,3	28,0	31,4	29,6	30,8	36,0
P03	50	43,8	49,6	50,5	45,1	48,0	43,9	P16	11	37,7	31,2	34,3	31,1	32,4	37,8
P04	26	35,2	40,0	42,0	36,4	38,4	41,2	P17	11	37,0	31,2	34,3	31,1	32,4	37,8
P05	34	35,9	43,6	45,1	39,3	41,6	42,3	P18	14	32,8	33,3	36,1	32,1	33,6	38,8
P06	50	42,7	49,6	50,5	45,1	48,0	43,9	P19	14	34,6	33,3	36,1	32,1	33,6	38,8
P07	20	36,9	36,9	39,3	34,3	36,0	40,2	P20	27	41,3	40,5	42,4	36,8	38,8	41,4
P08	29	34,9	41,4	43,2	37,5	39,6	41,7	P21	13	35,8	32,7	35,5	31,8	33,2	38,5
P09	27	36,3	40,5	42,4	36,8	38,8	41,4	P22	12	37,9	32,0	34,9	31,4	32,8	38,2
P10	9	39,0	29,7	32,9	30,3	31,6	37,0	P23	10	40,5	30,5	33,6	30,7	32,0	37,4
P11	35	38,9	44,0	45,5	39,7	42,0	42,4	P24	16	37,0	34,6	37,3	32,8	34,4	39,3
P12	11	41,0	31,2	34,3	31,1	32,4	37,8	P25	29	40,3	41,4	43,2	37,5	39,6	41,7
P13	14	40,0	33,3	36,1	32,1	33,6	38,8								
			$\phi_{CD}$ (°)	$\phi_A$	$\phi_B$	$\phi_C$	$\phi_D$	$\phi_E$							
			Média	38,3	37,2	39,5	35,1	36,9	40,0						
			Máximo	43,8	49,6	50,5	45,1	48,0	43,9						
			Mínimo	32,8	28,0	31,4	29,6	30,8	36,0						
			Mediana	37,9	35,2	37,8	33,2	34,8	39,5						
			Variância	8,68	42,22	32,72	22,51	27,89	5,17						
			Desvio Padrão	2,9	6,5	5,7	4,7	5,3	2,3						
			Cov (%)	7,70	17,57	14,53	13,57	14,37	5,70						

Como evidenciado, nenhuma das correlações apresenta valores precisamente idênticos aos obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto. Os valores exibem dispersões na relação em comparação com o valor lido, sendo que os desvios máximos da correlação com os ensaios de cisalhamento direto variaram de 6,8 até 12,3 graus.

Considerando o coeficiente de variação, o valor obtido (7,7%) no ensaio de cisalhamento direto encontram-se dentro da faixa indicada pela literatura, conforme indicado por Lacasse e Nadim (1998) e Kulhawy e Phoon (2008) *apud* Phoon (2015), com a Cov variando de 2 a 13% e 5 e 10% respectivamente para ensaios e medições a partir de ensaios de campo ou laboratório de boa qualidade. No entanto, os valores provenientes das correlações exibem uma variação mais ampla, com Cov de 5,7 a 17,57%, ainda assim, dentro do intervalo proposto por Kulhawy e Phoon (2008) *apud* Phoon (2015) de 15 a 20 para correlações indiretas com dados de SPT.

Os resultados apresentados na Figura 4 (a) revelam uma variação nos valores de  $\phi$  obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto, variando de 32,8° a 43,8°, com uma mediana de 37,8°. No entanto, os valores de  $\phi$  obtidos por meio de correlações com o ensaio de SPT mostram uma variação mais ampla. A Figura 4 (b) ilustra o quociente entre os resultados de  $\phi$  obtidos por meio das correlações com os valores de SPT e os obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto. Valores acima de 1,0 indicam que os dados obtidos pela correlação são superiores aos medidos, enquanto valores abaixo de 1,0 são inferiores. Observa-se que os

ângulos de atrito obtidos por meio de correlação com  $N_{SPT}$  abaixo de 20 golpes tendem a subestimar os valores em relação aos medidos no ensaio de cisalhamento direto, chegando a ser até 30% inferiores para  $N_{SPT}$  abaixo de 10.

Para conduzir uma avaliação estatística das correlações, foram realizados as análises dos resultados fornecidos por teste t pareado e de um teste de Wilcoxon pareado (também conhecido como teste de Mann-Whitney-Wilcoxon). Assim, analisam-se os valores de  $\phi$  obtidos no ensaio de cisalhamento direto com aqueles obtidos nas correlações do ensaio de SPT. Os resultados podem ser vistos na Tabela 4.

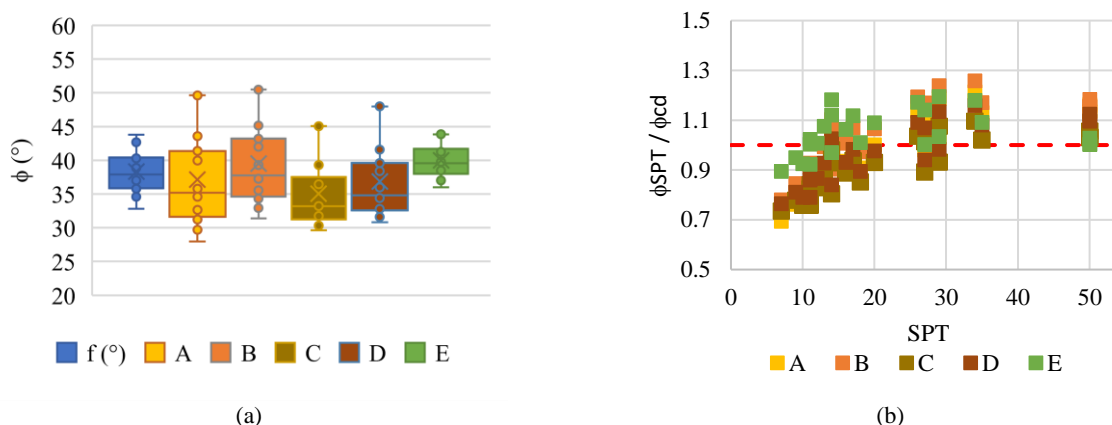


Figura 3. Parâmetro  $\phi$  (a) relação entre  $\phi$  obtido por correlação SPT e  $\phi$  medido em cisalhamento direto

Tabela 4. Resultado da análise estatística

Amostra 1	Amostra 2	Test	Statistic	z	df	Valor-p	
$\phi(CD)$	x	A	Student	0.969		24	0.342
		Wilcoxon	181.5	0.9		0.376	
$\phi(CD)$	x	B	Student	-1.092		24	0.286
		Wilcoxon	125	-1.009		0.319	
$\phi(CD)$	x	C	Student	3.799		24	< .001
		Wilcoxon	274.5	3.014		0.003	
$\phi(CD)$	x	D	Student	1.549		24	0.135
		Wilcoxon	213.5	1.372		0.174	
$\phi(CD)$	x	E	Student	-2.63		24	0.015
		Wilcoxon	69	-2.516		0.012	

Assumindo-se um grau de significância de 0,05. Para Peck, Hanson e Thombum (1974) (C), tanto o teste t de Student quanto o teste de Wilcoxon mostram valores-p, menores que 0.001, indicando que há evidência estatística com grau de significância de 5% para afirmar que as amostras são diferentes. Para Kulhawy e Chen (2007) (E), os valores-p para ambos os testes são menores que 0.05, indicando que há evidência estatística com grau de significância de 5% para afirmar que as amostras são diferentes. Entretanto, para Teixeira (1996) (A), Hatanaka e Uchida (1996) (B) e Godoy (1983) (C), os valores-p são maiores que 0.05, sugerindo que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de que não há diferença entre as medidas para esses grupos. Tanto o teste t para amostras de distribuição normal quanto o teste de Wilcoxon para dados não paramétricos apresentaram resultados parecidos.

#### 4. CONCLUSÃO

Fundamental na fase de projeto do sistema de fundação de usinas fotovoltaicas, a determinação do ângulo de atrito pode ser realizada por meio de ensaios de laboratório e ou correlação com ensaios de campo. A utilização de correlações propostas para o ensaio SPT é atrativa, mas requer atenção.

Identificou-se uma distribuição normal para os resultados de ângulo de atrito por meio do ensaio de cisalhamento direto e uma distribuição log-normal para os resultados de SPT. Os resultados revelaram que as correlações não apresentam valores precisamente idênticos aos obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto. Embora os desvios máximos das correlações com os ensaios de cisalhamento direto tenham variado de 6,8 a

12,3 graus, o coeficiente de variação para o ensaio direto (7,7%) está dentro da faixa indicada pela literatura. Embora, os valores provenientes das correlações exibem uma variação mais ampla, indicando uma maior dispersão os dados também estão aderentes a valores literários. Percebeu-se que os ângulos de atrito obtidos por meio de correlação com o número de golpes SPT tendem a subestimar os valores em relação aos medidos no ensaio de cisalhamento direto, especialmente para valores de  $N_{SPT}$  abaixo de 20 golpes.

Com base na análise estatística a correlação de Peck, Hanson e Thombum (1974) e Kulhawy e Chen (2007) indicam que há evidência estatística com grau de significância de 5% para afirmar que as amostras são diferentes. Nas correlações de Teixeira (1996), Hatanaka e Uchida (1996) e Godoy (1983), indicam que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de que não há diferença entre as medidas da correlação e o ângulo de atrito medido em cisalhamento direto.

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nosso sincero agradecimento à Araxá Engenharia pela sua disponibilidade e apoio na condução deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR. (2024) *Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo*. São Paulo. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *NBR 6484: Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT: Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2023). *ASTM D8030: Standard Practice for Sample Preparation for GCCM – Redline*.
- Barbetta, P. A., Menezes, M. R., & Bornia, A. C. (2010). *Estatística: para cursos de engenharia e informática*. 3. ed., Adas, São Paulo.
- Bezerra, A. L. M. (2023) *Energia solar corresponde a 11,6% da matriz energética brasileira*. Assembleia Legislativa do Estado do Piauí. Teresina. Disponível em: <<https://www.al.pi.leg.br/tv/noticias-tv-1/energia-solar-corresponde-a-11-6-da-matriz-energetica-brasileira>>. Acesso em 06 jan. 2024.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N., Albiero, J. H. (2011) *Fundações Diretas: Projeto Geotécnico*. 1. ed., Oficina de Textos, São Paulo – SP, 136 p.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2010). *Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Norte - Programa Geologia Do Brasil: Levantamento Da Geodiversidade*. Rio de Janeiro.
- Das, B. M. (2012). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, 656 p.
- Figueiredo, F. P. (2021) *Armazenamento de energia solar e eólica por usinas hidráulicas reversas: Uma solução para o Brasil?*. Dissertação. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/ Rio de Janeiro.
- Lacasse, S.; Nadim, F. (1998) Risk and reliability in geotechnical engineering. *Proceedings 4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, St Louis, MO.
- Lambe, T. W., Whitman, R. V. (1969) *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 553 p.
- Phoon, K. K. (2015) Reliability of geotechnical structures. In: *The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Fukuoka.
- Phoon, K. K.; Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36 (4): 612–24.
- Schnaid, F.; Odebrecht E. (2012) *Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Sivakugan, N. (2021) *Soil mechanics and foundation engineering: Fundamentals and applications*. McGraw Hill, New York.