

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/569

Uso combinado de ensaios geofísicos e geotécnicos para avaliação de parâmetros do solo

José Thiago da Silva Maciel
Terrasol Engenharia Geotécnica, Cajazeiras, Brasil, j.thiagomari@gmail.com

Bruno Andrade de Freitas
IFPB-Campus Patos, Patos, Brasil, andrade.bruno@ifpb.edu.br

Tiago de Jesus Souza
UFSCAR, São José dos Campos, Brasil, souza.tj@gmail.com

Antônio Felipe de Souza Machado Reis
Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, felipe.m.reis2@gmail.com

RESUMO: Este trabalho trata de uma análise comparativa entre resultados obtidos por meio de ensaios geotécnicos convencionais e os resultados de ensaios geofísicos para a caracterização do solo, no intuito de compreender como a utilização da geofísica pode contribuir para a determinação de parâmetros geotécnicos quando combinada aos métodos de investigações tradicionais. Assim, buscou-se por trabalhos consagrados na literatura que abordam essas duas metodologias de investigação geotécnica, de forma utilizar os dados desses estudos como base. Foram selecionados dois estudos de caso, sendo o primeiro referente à caracterização do solo da Asa Sul de Brasília, e o segundo sendo realizado no campo experimental da Escola de Engenharia de São Carlos. Através da aplicação de correlações entre os resultados obtidos nos ensaios sísmicos com parâmetros de projeto, foi realizada a caracterização do solo, apresentando uma boa acurácia nos resultados quando confrontados com os resultados obtidos através de investigações convencionais como ensaios SPT e ensaios de laboratório. Foi possível obter um comparativo entre os parâmetros estimados através dos resultados de ensaios Cross-hole, Down-hole e cone sísmico, permitindo avaliar a aplicabilidade desses ensaios em pequenas profundidades, bem como constatar a viabilidade dos ensaios sísmicos para a determinação dos parâmetros geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Métodos Geofísicos, Ensaios Sísmicos, Ensaios Geotécnicos, Correlações.

ABSTRACT: This work deals with a comparative analysis between results obtained through conventional geotechnical tests and the results of geophysical tests for soil characterization, with the aim of understanding how the use of geophysics can contribute to the determination of geotechnical parameters when combined with methods of traditional investigations. Therefore, we searched for established works in the literature that address these two geotechnical investigation methodologies, in order to use the data from these studies as a basis. Two case studies were selected, the first referring to the characterization of the soil of Asa Sul de Brasília, and the second being carried out in the experimental field of the São Carlos School of Engineering. Through the application of correlations between the results obtained in seismic tests with project parameters, the characterization of the soil was carried out, presenting good accuracy in the results when compared with the results obtained through conventional investigations such as SPT tests and laboratory tests. It was possible to obtain a comparison between the estimated parameters through the results of Cross-hole, Down-hole and seismic cone tests, allowing to evaluate the applicability of these tests at small depths, as well as verify the feasibility of seismic tests for determining geotechnical parameters.

KEYWORDS: Geophysical Methods, Seismic Tests, Geotechnical Tests, Correlations.

1 INTRODUÇÃO

Devido à variabilidade do solo, um bom programa de investigação geotécnica é imprescindível para a elaboração de projetos de Engenharia. Dentre os métodos de investigação mais utilizados destacam-se os métodos diretos de campo (como sondagem à percussão) e laboratório (caracterização geotécnica, cisalhamento direto e triaxial); investigação semi-direta (ensaio da palheta e piezocone). São necessários vários testes de campo e laboratório para a determinação de parâmetros selecionados, o que envolve um alto custo além de demandar um longo tempo para a execução. Nas últimas décadas o uso de métodos indiretos de investigação têm ganhado espaço para complementar a investigação do subsolo.

Alguns autores têm sugerido a utilização de técnicas híbridas, com a utilização da geofísica, para a estimativa de parâmetros do solo sem a necessidade da aplicação de correlações empíricas (MAYNE, 2000; SOUZA, 2011; POULOS, 2021). Esses métodos apresentam como vantagem uma investigação em área, ao contrário de outros ensaios, que tratam de uma investigação pontual. Assim, os métodos geofísicos oferecem um bom suporte para encontrar parâmetros de forma a melhorar o entendimento sobre o comportamento dos solos. Eles consistem em caracterizar o solo a partir das características físicas indiretas tais como a velocidade de propagação de ondas mecânicas ou a resistividade elétrica (CASTRO et al., 2016). Fonseca (2008) classifica estes como sísmicos, elétricos, eletromagnéticos e técnicas mistas (geotécnicas e geofísicas), podendo atuar na superfície ou entre sondagens no solo.

Nesse sentido, em virtude da grande variedade de métodos geofísicos, é necessário que se conheça quais os métodos que oferecem uma maior contribuição ao projeto geotécnico, de forma a se obter um dimensionamento mais assertivo e com um menor custo, já que projetos desse tipo normalmente são feitos utilizando fatores de segurança elevados devido às incertezas do solo, o que encarece ainda mais a obra.

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise do uso combinado de ensaios geofísicos e geotécnicos na estimativa de parâmetros do solo utilizados em projeto geotécnicos, identificando como eles podem complementar os métodos de investigação mais comumente utilizados para otimizar o dimensionamento geotécnico de forma segura e econômica, por meio de correlações diretas entre os resultados obtidos por esses ensaios e os parâmetros desejados, com ênfase nos métodos que utilizam de prospecção sísmica

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa desse trabalho consistiu em uma pesquisa bibliográfica sobre os métodos geofísicos de investigação, com ênfase nos métodos sísmicos que trabalham com a leitura da velocidade das ondas P (ondas de compressão) e S (ondas de cisalhamento).

Em seguida, buscou-se na literatura estudos que apresentassem correlações entre o valor da velocidade de onda de cisalhamento (V_s) e parâmetros obtidos nos métodos de investigação convencionais, como sondagem SPT e CPT, bem como parâmetros obtidos em ensaios de laboratório como módulo de cisalhamento (G_0), resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), módulo de Poisson (ν) e o módulo de deformabilidade (E).

Foram selecionados dois estudos envolvendo investigações geofísicas e ensaios SPT e CPT, que correspondem aos estudos de Fernandez (2017) em que foram utilizadas sondagens SPT, e o estudo de Souza (2011) que utilizou o ensaio de cone sísmico (SCPT).

Com base nos dados de V_s desses trabalhos, foram estimados os valores de G_0 , S_u , ν e E a partir do valor da velocidade de onda cisalhante e onda de compressão (V_p).

A seguir, serão apresentadas as principais correlações utilizadas, além de serem caracterizados os estudos de caso, bem como os dados que serão utilizados para este trabalho.

3 CORRELAÇÕES ENTRE RESULTADOS DE INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS E GEOTÉCNICAS

3.1 Correlações entre G_0 e V_s

A determinação de G_0 é feita através da Teoria da Elasticidade, ao medir os tempos de chegada da

onda de cisalhamento em sensores posicionados a uma determinada profundidade no solo e em seguida calculando a velocidade do percurso da onda entre os dois sensores (SCHNAID, ODEBRECHT, 2012).

Nesse sentido, como aponta Fonseca (2008), é com base em conceitos elásticos da Teoria de Onda que se tem a simples relação entre a velocidade de ondas sísmicas de corte, de pouca amplitude, e o módulo de deformação cisalhante como apresentado na Equação 1.

$$G_0 = \gamma \cdot V_S^2 \quad (1)$$

Onde γ é o peso específico em kN/m^3 .

O valor do módulo de cisalhamento pode ser influenciado por diversos fatores, como apontam os estudos de Giacheti (2001) e Hardin e Drnevich (1972) (*apud* SOUZA, 2011), em que os enquadrados como mais importantes são a amplitude de deformação, a tensão normal efetiva e o índice de vazios do solo. Além destes, nos solos coesivos o grau de saturação também representa um fator de grande influência no módulo de cisalhamento.

3.2 Correlações entre S_u e V_S

Assim como no CPTU, correlações entre a velocidade das ondas de cisalhamento e o valor de S_u para argilas podem ser determinadas, uma vez que ambas dependem de parâmetros em comum (L'HEUREUX, LONG, 2016). Assim, L'Heureux e Long (2016) apresentam a Equação 2, em que exhibe a correlação entre esses parâmetros. Outra correlação também é apresentada por Agaiby e Mayne (2015, *apud* POULOS, 2021), como indicado na Equação 3. Em ambas equações, V_S é dada em m/s e S_u em kPa .

$$S_u = 0,02 \cdot V_S^{1,45} \quad (2)$$

$$S_u = 0,152 \cdot V_S^{1,142} \quad (3)$$

3.3 Correlações entre ν e V_S

O módulo de Poisson do solo pode ser obtido através da Equação 4, apresentada por Fernandez (2017) em que $k = (V_P / V_S)^2$, sendo V_P a velocidade da onda P ou de compressão.

$$\nu = \frac{k - 2}{2k - 2} \quad (4)$$

3.4 Correlações entre E e V_S

O Módulo de Young ou Módulo de Deformabilidade (E) pode ser obtido através de ν e de G_0 utilizando a Teoria da Elasticidade, como apresentado na Equação 5:

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G_0 \quad (5)$$

Como já apresentado, esses parâmetros podem ser obtidos através do valor de V_S , com o G_0 dado em MPa e ν adimensional, obtendo o valor de E em MPa . Assim, temos que E também pode ser obtido diretamente através de V_P e V_S , além do peso específico (γ em kN/m^3), como se pode constatar pela Equação 6, apresentada por Duarte (1997 *apud* FERNANDEZ, 2017):

$$E = \gamma \cdot V_S^2 \cdot \left(\frac{3 V_P^2 - 2 V_S^2}{V_P^2 - V_S^2 / 3} \right) \quad (6)$$

4 ESTUDOS DE CASO

4.1 Caracterização Geológico-Geotécnica da Asa Sul de Brasília

O estudo realizado por Fernandez (2017) consistiu na realização de sondagens sísmicas por meio do MASW (*Multistation Analysis of Surface Wave*, Análise em Multi-estações de Ondas de Superfície), realizadas na Asa-Sul de Brasília. O autor definiu dois perfis principais onde foram locados pontos de sondagem geofísica de forma que se pudesse ter uma boa comparação com os perfis de sondagem que já haviam sido realizados na área. Os perfis definidos correspondem às quadras 215 Sul e 115 Sul, como mostra a Figura 1, onde foram realizadas as sondagens SPT por Oliveira (1996, *apud* FERNÁNDEZ, 2017). O autor então realizou sondagens utilizando métodos geofísicos nessa área de forma a gerar um novo perfil geológico-geotécnico a partir da integração de parâmetros obtidos por meio da geofísica e do ensaio SPT. A localização das sondagens utilizando a sísmica é mostrada na Figura 1.

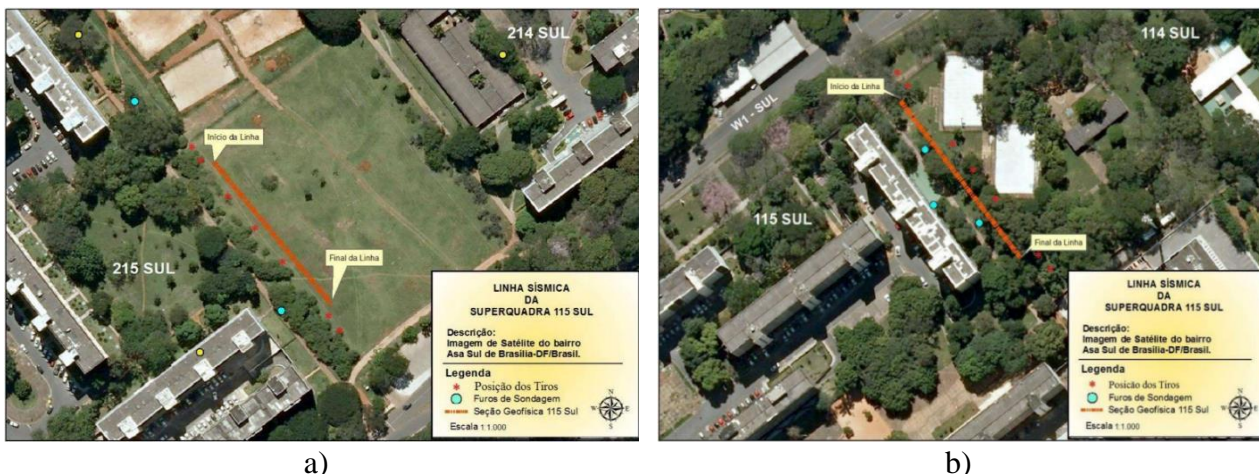


Figura 1. Croqui com localização das sondagens Sísmicas da Quadra (a) 215 Sul e (b) 115 Sul. Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

Os resultados da sondagem SPT apontaram a presença de um solo argilo-siltoso, com N_{SPT} 4 na camada inicial, que na quadra 115 se estende até a profundidade de 5,0m e na quadra 215 ocorre somente nos 2,0m iniciais. Conforme a profundidade aumenta, os valores de N_{SPT} se mantêm no intervalo de 5 a 15.

4.1.1 Sondagem Geofísica

A Tabela 1 mostra os perfis de solo obtidos a partir dos valores de V_s obtidos por meio do ensaio MASW, realizado por Fernandez (2017) nas quadras 215 Sul e 115 Sul, respectivamente. Assim, o autor definiu três pontos em cada perfil para registrar os valores máximos e mínimos de V_s em cada metro de profundidade. É possível notar que os perfis dos solos da quadra 215 apresentam uma maior estratificação, sendo possível identificar 5 camadas de solo com valores de V_s relativamente próximos e com pequena taxa de variação.

Tabela 1. Valores de V_s e de peso específico obtidos por meio de MASW na SQS 215 e SQS 115. Fonte: FERNÁNDEZ, 2017 (Adaptado).

Prof. (m)	γ (kN/m ³)	SQS 215			γ (kN/cm ³)	SQS 115		
		$V_{S,MED}$ (m/s)				$V_{S,MED}$ (m/s)		
		Perfil 1/215	Perfil 2/215	Perfil 4/215		Perfil 1/115	Perfil 2/115	Perfil 4/115
1 – 2	17,6	117,5	121	122	17,6	123,5	119	122
3 – 4	17,7	147	141	141,5	17,7	151	150,5	153
5 – 8	17,8	176	180,5	178,5	17,7	151	150,5	153
9 – 11	17,9	220	206	212	17,8	206	221,5	221,5
12 – 14	18,0	258	206	249	17,8	206	221,5	221,5

Além dos valores de V_s , as sondagens através do MASW permitiram obter os valores de onda de compressão (V_p). As Tabelas 2 apresenta os valores de V_p encontrados para as quadras 215 Sul e 115 Sul.

Tabela 2. Valores de V_p obtidos por meio de MASW na SQS 215 e SQS 115. Fonte: FERNÁNDEZ, 2017 (Adaptado).

Prof. (m)	SQS 215			SQS 115		
	Perfil 1/215	Perfil 2/215	Perfil 4/215	Perfil 1/115	Perfil 2/115	Perfil 4/115
1 – 11	411	411	411	405	405	405
12 – 14	1601	1601	1601	405	405	405

4.2 Campo Experimental de São Carlos

O estudo realizado por Souza (2011) envolveu a análise de várias campanhas de ensaios realizadas no campo experimental de EESC-USP São Carlos, com o intuito de aplicar um método para a previsão da curva tensão-recalque de fundações diretas assentes em solos tropicais arenosos a partir de resultados de ensaios de cone sísmico. Foram executados dois ensaios *down-hole* (DH1 e DH2) com o sistema desenvolvido por Vitali (2011), um ensaio SCPT (SCPT3) com cone sísmico comercial e três ensaios CPT (CPT1, CPT2 e CPT3), além de dois ensaios *cross-hole* (CH1 e CH2) e de três ensaios SCPT (SCPT1, SCPT2 e SCPT3). A Figura 2 apresenta a locação dos ensaios realizados.

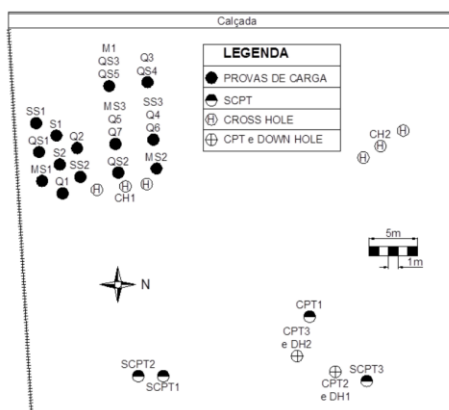


Figura 2. – Locação dos ensaios de campo realizados no campo experimental da EESC/USP – São Carlos. Fonte: SOUZA, 2011.

4.3.1 Ensaios de Laboratório

Para esse estudo, foram realizados diversos ensaios de laboratório para caracterizar os solos que ocorrem neste local. Como o foco do trabalho de Souza (2011) foi a análise do comportamento de fundações diretas, então só foram obtidos os índices físicos para as camadas superiores do solo, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Índices físicos médios para o campo experimental de São Carlos. Fonte: SOUZA, 2011.

Prof. (m)	γ (kN/m ³)	W (%)	e	n (%)	S (%)
1	14,2	13,7	1,174	54	38
2	15,6	14,6	0,993	50	52
3	16,0	15,8	0,965	50	58
4	16,7	16,8	0,943	49	70
5	14,8	16,4	0,822	47	60

4.3.2 Sondagens Geofísicas

Os dados obtidos por Souza (2011) para os valores de V_s são mostrados nas Tabelas 4 à 6, sendo divididos entre cada método utilizado para a obtenção dos dados.

Tabela 4. Resultados de V_s do ensaio *Down-hole* para o campo experimental de São Carlos. Fonte: SOUZA, 2011.

Prof. (m)	DH1 V_s (m/s)	DH2 V_s (m/s)	DH3 V_s (m/s)
2,5	310,71	329,18	-
3	285,05	314,29	391,16
3,5	292,70	335,83	-
4	297,04	317,76	352,43
4,5	335,40	316,29	-
5	330,65	317,03	314,34

Tabela 5. Resultados de V_s do ensaio *Cross-hole* para o campo experimental de São Carlos. Fonte: SOUZA, 2011.

Prof. (m)	CH1 – V_s (m/s)	Prof. (m)	CH2 – V_s (m/s)
0,7	238	0,5	193,33
1,2	260	1,5	223,58
1,7	263	2,5	254,42
2,2	270	3,5	269,12
2,7	266	4,5	293,42
3,2	277	5,5	304,62
3,7	311	-	-
4,2	311	-	-
4,7	317	-	-
5,2	308	-	-
5,7	282	-	-

Tabela 6. Resultados de V_s do ensaio SCPT para o campo experimental de São Carlos. Fonte: SOUZA, 2011.

Prof. (m)	SCPT 1 – V_s (m/s)	SCPT 2 – V_s (m/s)
1,4	185,30	149,97
2,4	264,84	221,08
3,4	298,67	288,68
4,4	293,39	281,29
5,4	300,04	303,74

5 RESULTADOS

5.1 Parâmetros de Projeto Estimados a Partir de V_s

Os parâmetros de projeto foram estimados a partir das correlações apresentadas anteriormente. Foram utilizados os valores de V_s do estudo de Fernández (2017) para se estimar os valores dos parâmetros analisados. Os resultados encontrados foram comparados com os valores de referência encontrados na literatura para os tipos de solos encontrados nas sondagens.

Através da análise dos resultados obtidos, foi possível dividir o perfil do solo em camadas distintas baseadas nos valores dos parâmetros encontrados. Na quadra 215 Sul foi possível dividir em 5 camadas, já a quadra 115 Sul apresentou 3 camadas distintas de solo.

A Tabela 7 apresenta os resultados para os valores médios estimados para os parâmetros do solo a partir das correlações representadas pelas Equações 1 à 6.

Tabela 7. Caracterização do perfil de solo da quadra 115 Sul e 215 Sul a partir dos ensaios sísmicos.

Camada	115 Sul					215 Sul				
	Prof. (m)	G_0 (MPa)	S_u (kPa)	ν	E (MPa)	Prof. (m)	G_0 (MPa)	S_u (kPa)	ν	E (MPa)
1	1 – 2	25,99	28,79	0,45	75,47	1 – 2	25,42	28,40	0,45	73,95
2	3 – 8	40,63	38,00	0,42	115,59	3 – 4	36,29	35,39	0,43	104,07
3	9 – 14	83,40	59,61	0,30	220,14	5 – 8	56,61	46,67	0,38	157,58
4	-	-	-	-	-	9 – 12	81,02	58,33	0,32	216,18
5	-	-	-	-	-	13 – 14	119,75	74,48	0,49	356,08

A caracterização do solo, utilizando parâmetros determinados a partir das correlações com o valor de V_s obtido em ensaios sísmicos, mostrou-se similar com a caracterização tátil visual encontrada no relatório de sondagem SPT apresentado por Fernández (2017).

5.3 Parâmetros de Projeto Estimados por Diferentes Ensaios Sísmicos

A partir dos dados obtidos do estudo de caso realizado por Souza (2011) no campo experimental de São Carlos, foi possível estimar os valores de G_0 , S_u e o valor de E através do valor da velocidade de onda cisalhante obtida por ensaios *cross-hole*, *down-hole* e SCPT. Os resultados podem ser visualizados graficamente na Figura 3.

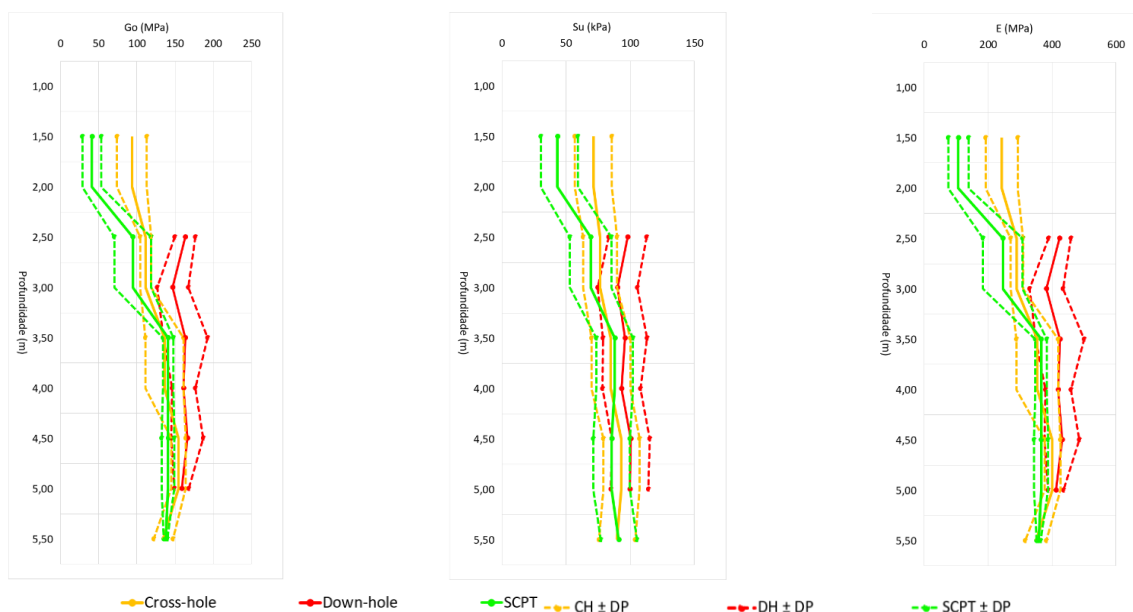


Figura 3. Resultados de G_0 , S_u e E obtidos através de diferentes ensaios no campo experimental de São Carlos.
 Fonte: Autores.

Através da análise dos gráficos, é possível notar uma grande variação entre os dados nas camadas superiores do solo. No entanto, conforme avança na profundidade, os resultados tornam-se mais homogêneos entre os métodos, além de apresentarem uma menor dispersão entre si, com um coeficiente de variação inferior a 30%. Essa variação nas camadas superiores, segundo Souza (2011), pode ser atribuída à variação na compactação da camada superficial do solo, na sua composição, na variação da sucção matricial ou de uma possível interferência de ondas de superfície na interpretação dos valores de V_s . Além disso, devido às camadas iniciais geralmente se tratarem de camadas de aterro, estas tendem a apresentar uma variabilidade em seus parâmetros comparado ao que se espera de um solo natural, o que também pode refletir em divergências nos resultados obtidos por diferentes ensaios.

6 CONCLUSÃO

Foi possível obter uma caracterização dos parâmetros geotécnicos do solo para os perfis das quadras 115 Sul e 215 Sul a partir de métodos geofísicos de aquisição sísmica. O resultado demonstrou ser coerente, considerando o caráter do solo analisado, comparado com os resultados de sondagens SPT.

Já no campo experimental de São Carlos, foi possível realizar um comparativo entre os valores dos parâmetros estimados por diferentes métodos de aquisição sísmica. Para as camadas superiores de solo, verificou-se uma divergência considerável entre os valores, o que pode ser atribuído a variáveis como a compactação superficial do solo, ressecamento e sucção matricial ou a fato de existir uma divergência na aquisição dos registros de ondas S por conta da interferência de ondas de superfície. Tal divergência, entretanto, não se mostra em camadas inferiores, onde se verifica que os parâmetros obtidos a partir dos resultados de ensaios *cross-hole* e *down-hole* se mostraram próximos aos determinados por ensaios de cone sísmico, indicando que estes ensaios podem ser realizados para a determinação dos valores de G_0 , E e S_u . Assim, recomenda-se que em estudos futuros seja feita uma análise comparativa entre esses métodos em investigações mais profundas, buscando também uma análise para estimativa de parâmetros de resistência do solo como coesão e o ângulo de atrito.

REFERÊNCIAS

- Castro, Bruno Carrilho de, *et al.* (2016). *Perfis geotécnicos da Cidade de Palmas-TO por meio de sondagens SPT e ensaios geofísicos*. Anais XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (XVIII COBRAMSEG), Belo Horizonte.
- Fernández, B. P. (2017). *Caracterização geológico-geotécnica de solos da Asa Sul a partir de métodos de aquisição sísmica*. Brasília, Distrito Federal-Brasil. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas). Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Brasília, 2017.
- Fonseca, A. Viana da. (2008). *Caracterização de solos residuais em projeto geotécnico assistido por ensaios*. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal. Disponível em <https://hdl.handle.net/10216/67289>. Acesso em 12 out 2021.
- L'heureux, J.S.; Long, M. (2016). *Correlations between shear wave velocity and geotechnical parameters in Norwegian clays*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 04017013-1 to 20. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317759597_Correlations_between_shear_wave_velocity_and_geotechnical_parameters_in_Norwegian_clays. Acesso em 20 fev. 2022.
- Mayne, Paul W. (2000). *Enhanced geotechnical site characterization by seismic piezocone penetration tests*. Invited Lecture, Fourth International Geotechnical Conference, Cairo University, janeiro 2000, pp. 95-120
- Poulos, Harry George. (2021). *Use of Shear Wave Velocity for Foundation Design*. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-493427/v1>. Acesso em 20 fev. 2022.
- Schnaid, Fernando; Odebrecht, Edgar. (2012). *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- Souza, Luiz Antonio; Gandolfo, Otavio. (2012). *Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental*. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2. 9-27. 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/268799604_Metodos_geofisicos_em_geotecnia_e_geologia_ambiental. Acesso em 20 fev. 2022.
- Souza, Tiago de Jesus. (2011). *Previsão da curva tensão-recalque em solos tropicais arenosos a partir de ensaios de cone sísmico*. 2011. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. doi:10.11606/D.18.2011.tde-25042012-163755. Acesso em: 27 fev. 2022.
- Vitali, Osvaldo Paiva Magalhães. (2011). *Desenvolvimento de um sistema para a realização de ensaios sísmicos down-hole em conjunto com o CPT*. São Carlos, São Paulo. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação e Área de concentração em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. DOI: 10.11606/D.18.2011.tde-01122011-100235.