

Caracterização Geotécnica de Campos Experimentais para Estudo do Comportamento de Fundações por Estacas Helicoidais

Oskar Leonardo Laurani López
Mestrando em Geotecnia, EESC/USP, São Carlos, Brasil, o.laurani@usp.br

Amanda Regina Foggiato Christoni
Doutoranda em Geotecnia, EESC/USP, São Carlos, Brasil, arfchristoni@usp.br

Thaise da Silva Oliveira Morais
Pós-doutoranda em Geotecnia, EESC/USP, São Carlos, Brasil, tsmorais@sc.usp.br

João Manoel Sampaio Mathias dos Santos Filho
Pós-doutorando em Geotecnia, EESC/USP, São Carlos, Brasil, jmsmfilho@sc.usp.br

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha
Professora no departamento de Geotecnia, EESC/USP, São Carlos, Brasil, chctsuha@sc.usp.br

RESUMO: Este artigo apresenta a caracterização por meio de ensaios *in situ* de três Campos Experimentais no Brasil, onde serão instaladas fundações por estacas helicoidais e realizadas provas de carga instrumentadas, para estudos a serem desenvolvidos na EESC/USP. Três campanhas de ensaios de campo foram realizadas com o propósito de caracterizar, definir o perfil geotécnico e estimar parâmetros geomecânicos, essenciais para prever o comportamento dessas fundações estudadas em condições reais. Uma síntese das características geológicas e dos resultados dos ensaios de campo (SPT e CPTu) é apresentada para cada um dos três campos experimentais com suas respectivas interpretações detalhadas, incluindo uma descrição dos resultados de forma individual e em conjunto. Ao final, são apresentados os perfis geotécnicos, um resumo dos parâmetros geomecânicos do solo (estimados por meio de correlações empíricas a partir dos ensaios de campo), o tipo de solo e as condições do terreno.

PALAVRAS-CHAVE: Campo experimental, Ensaios de campo, Parâmetros do solo, Fundações, Estaca helicoidal

ABSTRACT: This article presents the characterization through *in situ* testes of three Experimental Fields in Brazil, where helical pile foundation will be installed and instrumented load test will be conducted for studies to be developed at EESC/USP. Three field test campaigns were carried out with the purpose of characterizing, defining the geotechnical profile and estimating geomechanical parameter, essential for predicting the behavior of these foundations studied under real conditions. A synthesis of the geological characteristics and the results of the filed test (SPT and CPT) is presented for each of the three experimental fields with their respective detailed interpretations, including a description of the results individually and collectively. Finally, the geotechnical profiles, a summary of the soil geomechanical parameters (estimated through empirical correlations form field test), the soil type, and the ground conditions are presented

KEYWORDS: Experimental field, Field tests, Soil parameters, Foundations, Helical pile

1 INTRODUÇÃO

Os campos experimentais desempenham um papel importante na engenharia geotécnica, oferecendo valiosa informação para a compreensão do comportamento solo-estrutura em escala real, especialmente no contexto das fundações de estruturas.

Cavalcante *et al.* (2007) fornecem uma síntese significativa de pesquisas realizadas ao longo de mais de três décadas. Seu trabalho destaca a importância de compreender o perfil de cada campo e obter informações sobre as pesquisas geológicas-geotécnicas realizadas, bem como o comportamento de fundações de acordo com o solo de instalação. Esses trabalhos não só servem apenas como valiosa referência bibliográfica, mas

também lança luz sobre a história, área, localização, número de pesquisadores e publicações existentes nesses locais, o que é fundamental para o avanço e aplicação prática no campo da engenharia geotécnica.

O presente trabalho analisa três campos experimentais em diferentes estados brasileiros: Minas Gerais (Contagem), Santa Catarina (Itajaí) e São Paulo (Itirapina). Os locais foram escolhidos para investigar diferentes tipos de solo, visando estabelecer uma base para futuras provas de cargas instrumentadas em estacas helicoidais. O propósito deste estudo é detalhar o solo e estabelecer um perfil geotécnico estimado para compreender sua interação com as estacas. A metodologia incluiu uma análise geral acerca da geologia, ensaios de campo (SPT e CPTu), interpretação dos resultados a fim de obter diversos parâmetros geotécnicos por meio de correlações empíricas recomendadas pela literatura especializada baseadas nos dados coletados dos ensaios de campo e as classificações *in situ* das amostras associadas e uma análise estatística para estimar o valor médio e um coeficiente de variação dos diversos parâmetros geotécnicos.

2 CAMPOS EXPERIMENTAIS

Os campos experimentais mencionados estão situados em três cidades brasileiras localizadas em estados distintos: Contagem, em Minas Gerais (MG); Itirapina, em São Paulo (SP) e Itajaí, em Santa Catarina (SC), conforme detalhado nas coordenadas da Tabela 1. Cada um desses campos apresenta características únicas, tanto em relação ao tipo de solo quanto ao seu comportamento. Essas informações são cruciais para a instalação adequada das fundações por estacas helicoidais em estudo, pois o comportamento solo-estaca pode variar consideravelmente de acordo com o perfil do terreno de instalação.

Tabela 1. Localização geográfica de cada campo experimental.

Campo Experimental	Coordenadas		
	Longitude	Latitude	Zona
1 Contagem/MG (Filial Vertice)	601984	7792131	23 K
2 Itirapina/SP (CRHEA-USP)	200966	7545365	23 K
3 Itajaí/SC (Subestação Itajaí 2)	728247	7015255	22 J

Este artigo apresenta um resumo das principais características dos três campos experimentais, começando com suas características geológicas, seguido pela descrição dos ensaios de campo (SPT e CPTu) e, por último, a interpretação para estabelecer um perfil geotécnico do local. A escolha dos campos experimentais se deve principalmente às notáveis diferenças topográficas e climáticas entre as regiões do país, o que influencia o comportamento das formações geológicas locais.

2.1 Campo Experimental de Contagem/MG

2.1.1 Aspectos Geológicos

Localizada no domínio do embasamento meridional do Cráton de São Francisco, a região é marcada pela presença de terrenos gnáissicos migmatíticos, corpos granitóides e a sequência *greenstone belt* do Supergrupo Rio das Velhas. É importante destacar a presença de rochas arqueanas do Supergrupo Rio das Velhas, especialmente na área compreendidas pelas cidades de Juatuba, Florestal e Mateus Leme. Essas rochas arqueanas desempenham um papel crucial na compreensão da tectônica arqueana no centro-sul de Minas Gerais, contribuindo para elucidar processos geológicos antigos que moldaram a região. A geologia superficial de Contagem e seus arredores pode incluir depósitos aluviais, terraços fluviais e outros sedimentos recentes que se acumularam na superfície (ROMANO *et al.*, 2009).

2.1.2 Ensaios de Campo

Realizou-se uma campanha de investigação de campo no terreno da filial da empresa Vértice Engenharia em Contagem. Dentre os tipos de investigação realizados no local, destacam-se os ensaios SPT e CPTu. Foram realizadas três sondagens com medição de número de golpes (N_{SPT}), conforme estabelecido pela NBR 6484

(ABNT 2020) e dois ensaios de piezocone (CPTu), empregando-se um cone elétrico. A localização dos ensaios está representada na Figura 1 e na Tabela 2.

Tabela 2. Coordenadas dos ensaios de campo realizados em Contagem/MG.

No	Código	Profundidade (m)	Coordenadas UTM ¹		
			Longitude	Latitude	Zone
1	SP-01	30	601987	7792140	23 K
2	SP-02	15	601980	7792122	23 K
3	SP-03	25	601984	7792131	23 K
1	CPTu-01	23	601988	7792142	23 K
2	CPTu-02	23	601981	7792124	23 K

¹ Coordenadas aproximadas

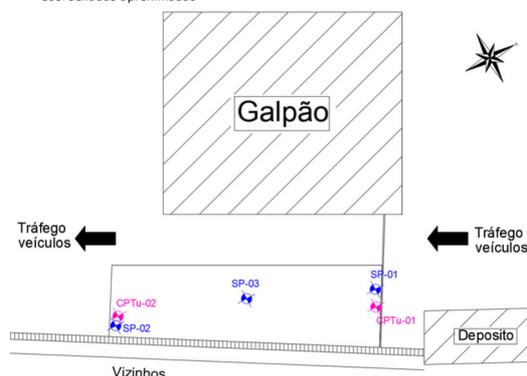


Figura 1. Localização dos ensaios de campo em Contagem/MG.

Os valores de N_{SPT} obtidos variaram entre 1 e 16 golpes/30cm, até uma profundidade de 18m. Posteriormente, observou-se um aumento importante no número de golpes. No caso do CPTu, foi possível confirmar a mudança na resistência do solo previamente identificada pelo ensaio SPT. Além disso, tanto no SPT quanto no CPTu, os furos de investigação feitos na direção norte (SP-01 e CPTu-01) apresentam valores mais elevados do que aqueles realizados no lado oposto (SP-02 e CPTu-02). A Figura 2 apresenta os valores obtidos nos ensaios SPT e CPTu ao longo do perfil do solo.

A Figura 3 apresenta perfil estratigráfico do solo no Campo Experimental, baseado nas sondagens SPT e CPTu. Observa-se que o maciço de solo do local pode ser dividido em três camadas principais. A primeira consiste em uma argila siltosa com pouca areia fina, de cor vermelha e mole, que se estende até aproximadamente 7,0 m de profundidade. A segunda camada é composta por um silte pouco arenoso de cor vermelho claro/amarelo, medianamente compacto, que alcança uma profundidade aproximada de 17,1 m a 21,2 m (dependendo da posição). Finalmente, a terceira camada é constituída por um silte arenoso e arenosiltoso compacto. O nível d'água atinge aproximadamente 13m de profundidade.

A análise dos ensaios SPT e CPTu proporcionou uma estimativa dos parâmetros geomecânicos do solo do local. Essas correlações empíricas consideram diversas variáveis como: o tipo de solo, as condições do terreno durante a realização dos ensaios e dos valores obtidos nos próprios ensaios. No caso do ensaio SPT, é considerado o número de golpes/30cm de penetração e a energia de aplicação, enquanto para o ensaio CPTu, são avaliados a resistência de ponta (q_c), por atrito lateral (f_s) e a poropressão (u_2) (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo dos parâmetros geomecânicos estimados para o campo de Contagem/MG.

Camada	Parâmetros do solo											
	γ (kN/m ³) ¹		D_r (%) ²		ϕ (°) ³		S_u (kPa) ⁴		E (MPa) ⁵		G_0 (MPa) ⁶	
	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)
U.GEO.01	17.9	4.5	-	-	-	-	101.1	49.6	3.8	22.7	-	-
U.GEO.02	19.6	2.7	-	-	-	-	229.9	25.1	6.3	22.9	-	-
U.GEO.03	20.5	1.17	35.5	21.08	35	3.5	-	-	21.3	17.0	120	4.2

¹ CPTu (Robertson, Cabal (2010), Mayne (2010, 2014), Baginska (2016), Lengkeek et al (2018)) - SPT (Godoy (1972))

² CPTu (Baldi et al (1986), Jamiolkowski et al (2003), Mayne (2007)) - SPT (Budhu M. (2011))

³ CPTu (Robertson et al.(1986), Kulhawy, Mayne (1990), Uzielli et al (2013)) - SPT (Godoy (1983), Budhu M. (2011))

⁴ CPTu (Lunne et al., (1997), Schnaid F (2012), Kulhawy&Mayne (1990), Rémai (2013)) - SPT (Teixeira e Godoy (1996), Hara, A., et al. (1971), Budhu, M. (2011))

⁵ SPT (Bowles, J. (1996) - Solo de tipo silte, silte arenoso ou silte argiloso (Tabela 5-6))

⁶ CPTu (Schnaid (2005, 2009), Esllaamizaad & Robertson (1997))

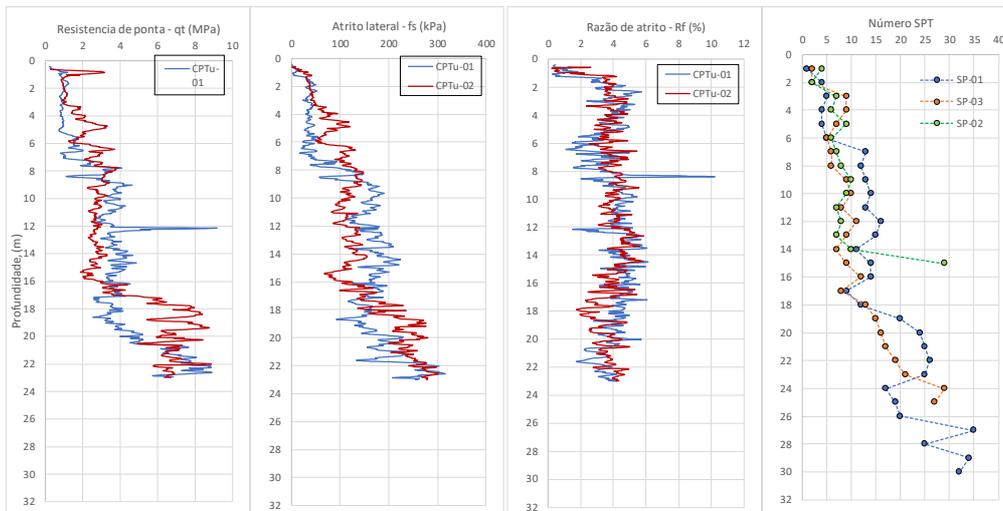


Figura 2. Resultados dos ensaios de campo ao longo do perfil do solo (SPT e CPTu) de Contagem/MG.

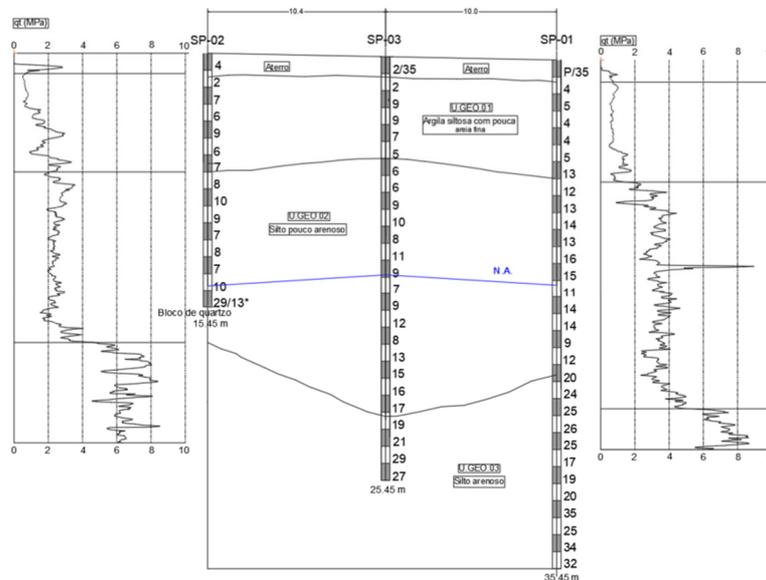


Figura 3. Perfil geotécnico de Contagem/MG.

2.2 Campo Experimental de Itirapina/SP

2.2.1 Aspectos Geológicos

O local é caracterizado pela formação Serra Geral. Esta formação é constituída por materiais residuais originados de diabásio, deste modo, apresentam espessuras variáveis de solo, mesmo quando desenvolvidos em condições de declividade semelhante (SANTOS, 2013).

De acordo com Silva (2005), este solo geralmente exibe baixa resistência e tem uma textura predominantemente argilosa. Entretanto, em determinados locais analisados, a fração de silte torna-se predominante, especialmente nas áreas próximas ao maciço rochoso. Sua coloração varia de amarelo, devido a presença de goetita, a avermelhada variegada, devido a presença de hematita (*apud* SANTOS, 2013).

2.2.2 Ensaios de Campo

Realizou-se uma campanha de investigação de campo no Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais, da Universidade de São Carlos – CRHEA/USP, na cidade de Itirapina/SP. Foram realizadas três

sondagens com medição de N_{SPT} , conforme estabelecido pela NBR 6484 (ABNT 2020). A localização dos ensaios está representada na Figura 4 e na Tabela 4.

Tabela 4. Coordenadas dos ensaios de campo realizados em Itirapina/SP.

No	Código	Profundidade (m)	Coordenadas UTM ¹		
			Longitude	Latitude	Zona
1	SP-01	16.50	200972	7545356	23 K
2	SP-02	13.78	200965	7545367	23 K
3	SP-03	13.35	200963	7545374	23 K

¹ Coordenadas aproximadas

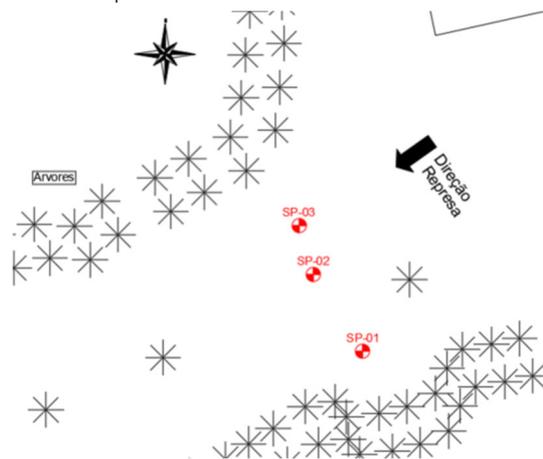


Figura 4. Localização dos ensaios de campo em Itirapina/SP.

Os valores de N_{SPT} obtidos variam entre 2 a 10 golpes/30cm, até uma profundidade de 10m. Posteriormente, observou-se um aumento no número de golpes entre 14 e 22 golpes/30cm, e finalmente atingiu uma camada impenetrável ao trépano de lavagem (rocha alterada ou matacão). A Figura 5a apresenta os valores obtidos nos ensaios SPT e o coeficiente de variação ao longo do perfil do solo.

A Figura 5b apresenta perfil estratigráfico do solo no Campo Experimental, com base nas sondagens SPT. Observa-se que o maciço de solo do local pode ser dividido em duas camadas principais. A primeira consiste em uma areia fina argilosa, de cor marrom avermelhada, pouco compacta, estendendo-se até aproximadamente 11,0 m de profundidade. A segunda camada é composta por uma areia fina siltosa argilosa de cor variegada, mediamente compacta, podendo atingir, em alguns pontos, uma profundidade de até 16,5 m. Finalmente, nas três sondagens foi identificada uma camada resistente e impenetrável, sugerindo a presença de rocha alterada ou matações. O nível d'água atingiu aproximadamente 15,8 m de profundidade na sondagem SP-01.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros geomecânicos estimados para cada camada do perfil geotécnico, obtidos por meio de correlações empíricas com os resultados dos ensaios CPTu e SPT, levando em consideração o tipo de solo e as condições do terreno durante a execução dos ensaios.

Tabela 5. Resumo dos parâmetros geomecânicos estimados do solo de Itirapina/SP.

Camada	Parâmetros do solo							
	γ (kN/m ³) ¹		D_r (%) ²		ϕ (°) ³		E (MPa) ⁴	
	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)
U.GEO.01	16.0	11.6	24.3	36.9	30	5.73	4.3	35.8
U.GEO.02	19.8	7.06	61.8	27.2	36	10.0	10.4	22.3

¹ Godoy (1972)

² Budhu M. (2011)

³ Godoy (1983), Budhu M. (2011)

⁵ Bowles, J. (1996) - Solo de tipo silte, silte arenoso ou silte argiloso (Tabela 5-6)

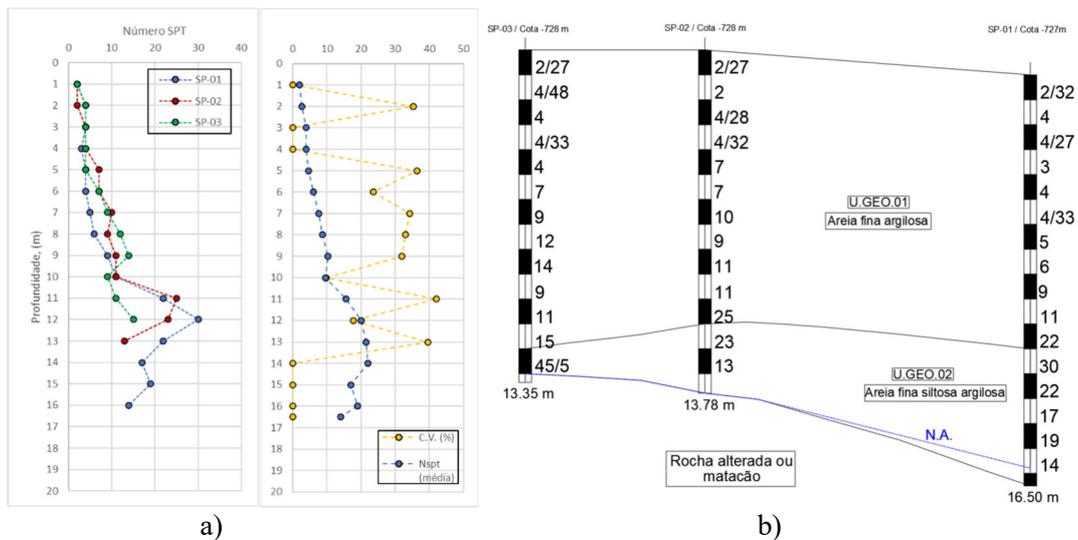


Figura 5. a) Resultados dos ensaios de campo ao longo do perfil do solo (SPT) de Itirapina/SP; b) Perfil geotécnico de Itirapina/SP.

2.3 Campo Experimental de Itajaí/SC

2.3.1 Aspectos Geológicos

A bacia do Itajaí foi formada durante os estágios finais do Ciclo Brasileiro, no Neoproterozóico Superior. Sua orientação é alongada no sentido sudoeste-nordeste, seguindo a direção predominante no escudo catarinense. Ao Norte, a bacia faz contacto tectônico com o Complexo Granulítico de Santa Catarina, enquanto ao sul, apresenta duas unidades distintas: o Complexo Metamórfico Brusque composto por rochas supracrustais metamorfizadas, e a Faixa Ribeirão da Prata, constituída por gnaisses retrometamorfizados durante o Ciclo Brasileiro. A sequência estratigráfica da Bacia de Itajaí é composta por conglomerados, arenitos de leques aluviais, depósitos deltaicos, sedimentos fluviais, ritmitos turbidíticos, pelitos marinhos profundos, e camadas de tufos interdigitadas. Além disso, granitos e riolitos hipabissais cortam toda a sequência sedimentar da bacia (SCHROEDER, 2006).

2.3.2 Ensaios de Campo

Realizou-se uma campanha de investigação de campo na subestação Itajaí 2 em Santa Catarina. Dentre os tipos de investigação de campo realizados no local, destacam-se os ensaios SPT e CPTu. Foram realizadas três sondagens com medição de N_{SPT} , conforme estabelecido pela NBR 6484 (ABNT 2020), e três ensaios de piezocone (CPTu), empregando-se um cone elétrico. A localização dos ensaios está representada na Figura 6 e na Tabela 6.

Tabela 6. Coordenadas dos ensaios de campo realizados em Itajaí/SC.

No	Código	Profundidade (m)	Coordenadas UTM ¹		
			Longitude	Latitude	Zona
1	SP-01	7.56	728222	7015216	22 J
2	SP-02	10.24	728301	7015280	22 J
3	SP-03	17.76	728254	7015266	22 J
4	CPTu-01	7.86	728216	7015232	22 J
5	CPTu-02	13.32	728301	7015277	22 J
6	CPTu-03	8.34	728256	7015262	22 J

¹ Coordenadas aproximadas

Os valores de N_{SPT} obtidos para os sete primeiros metros de profundidade variam de praticamente 0 (amostrador cravado com o peso do martelo) até 2 golpes/30cm, comportamento característicos de um solo muito mole. Posteriormente, nas três sondagens SPT foi identificado uma camada resistente composta de

pedras, pedregulho e areia com uma espessura de aproximadamente 1m. Só no ensaio SP-03 foi possível atravessar essa camada e observou-se que o número de golpes teve um aumento considerável em comparação com a camada superficial, até atingir novamente uma camada resistente, impenetrável ao trépano de lavagem a uma profundidade de 17,76 m. No caso do CPTu, a cravação da ponteira só foi possível apenas até atingir a primeira camada resistente (composta de pedras e pedregulho). A Figura 7 apresenta os valores obtidos nos ensaios penetrométricos de SPT e CPTu ao longo do perfil do solo.

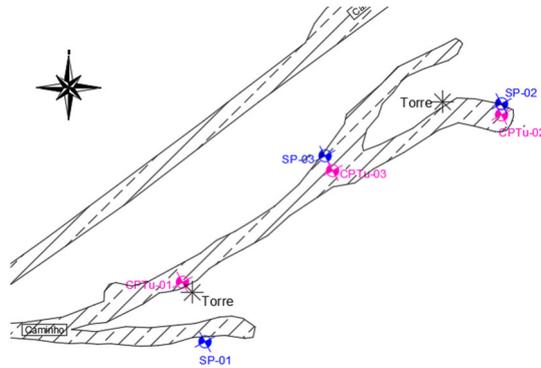


Figura 6. Localização dos ensaios de campo em Itajaí/SC.

A Figura 8 apresenta o perfil geotécnico do solo do Campo Experimental, com base em sondagens SPT e CPTu. Observa-se que o maciço de solo do local pode ser dividido em três camadas principais. A primeira camada consiste em uma argila cinza muito mole, estendendo-se até 8,0 m na porção mais profunda. Posteriormente, uma camada de pedras e pedregulho com espessura aproximada de 1 m e a terceira camada é composta por uma argila arenosa com pedregulhos variegada de cor amarelo e medianamente compacta. Finalmente, outra camada de pedras e pedregulho. O nível d'água encontra-se em superfície.

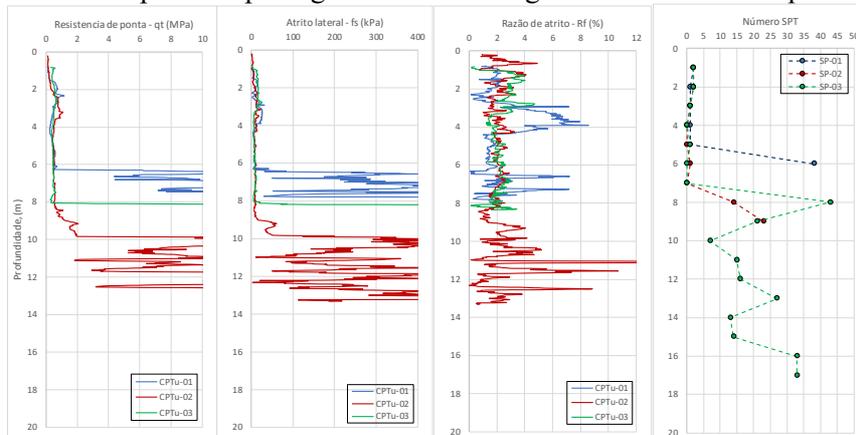


Figura 7. Resultados dos ensaios de campo ao longo do perfil do solo (SPT e CPTu) de Itajaí/SC.



Figura 8. Perfil geotécnico de Itajaí/SC.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros geomecânicos estimados para cada camada do perfil geotécnico, obtidos por meio de correlações empíricas com os resultados dos ensaios CPTu e SPT, levando em consideração o tipo de solo e as condições do terreno durante a execução dos ensaios. As correlações usadas são as mesmas às empregadas nas outras análises.

Tabela 7. Resumo dos parâmetros geomecânicos estimados do solo de Itajaí/SC.

Camada	Parâmetros do solo					
	γ (kN/m ³)		S_u (kPa)		E (MPa)	
	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)
U.GEO.01	15.6	6.1	33.8	63.9	2.4	51.8
U.GEO.02	20.8	5.7	168.1	45.9	24.6	28.2

3 CONCLUSÕES

Este estudo oferece uma visão geral das diferentes características geotécnicas dos campos experimentais em Contagem (MG), Itirapina (SP) e Itajaí (SC). Cada local apresenta singularidades geológico-geotécnicas que influenciam diretamente o comportamento do solo e, conseqüentemente, na instalação e comportamento das fundações por estacas helicoidais. A análise geotécnica realizada nos três campos experimentais revelou uma variedade de perfis do solo, desde solos argilosos moles até materiais altamente resistentes (maciço rochoso). Os ensaios de campo, o SPT e CPTu, foram cruciais para determinar as propriedades geotécnicas do solo em cada local. Os resultados obtidos destacam a importância de considerar as condições específicas de cada região ao projetar uma fundação. Além disso, as correlações empíricas desenvolvidas a partir dos ensaios de campo fornecem uma base para estimar os parâmetros resistentes do solo, ferramenta essencial na hora de prever a capacidade de carga das fundações por estacas helicoidais. É importante uma abordagem correta e contextualizada em projetos geotécnicos, ajustando as técnicas de fundação às condições geológicas geotécnicas locais.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento ao Grupo Neoenergia, Projeto PD-07284-0002/2020 do programa de P&D ANEEL e à empresa Vértice Engenharia pela disponibilização da área de teste em Contagem – MG e pela colaboração constante. O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Bowles, J. (1997) *Foundation Analysis and Design*, Fifth edition, McGraw-Hill, 1024p.
- Cavalcante, E. H. *et al.* (2007) Campos experimentais brasileiros. *Geotecnia*, n. 111, p. 99-205.
- Eslami, A., Eslami, M., Molaabasi, H., Moshfeghi, S. (2019) *Piezocene and Cone Penetration Test (CPTu and CPT) Application in Foundation Engineering*, Butterworth-Heinemann, Elsevier, 390p.
- Fellenius, B. (2023) *Basic of Foundations Design*, Electronic Edition, Canada, 546p.
- Muni, B. (2010) *Soil Mechanics and Foundation*, Third Edition, Jhon Wiley & Sons. Inc, 784p.
- Robertson, P. K., Cabal, K. L. (2010) Estimating soil unit weigh from CPT. *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, Huntington Beach, C, EEUU.
- Romano *et al.* (2009) *Geologia e recursos minerais da folha Contagem SE.23-Z-C-V*, estado de Minas Gerais, escala 1:100.000. Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 87p.
- Santos, T. C. (2013) *Efeito da configuração das hélices na capacidade de carga à tração de estacas metálicas helicoidais em solo tropical*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 171 p.
- Schnaid, F., Odebrecht, E. (2012) *Ensaio de Campo e suas aplicações a engenharia de fundação*, 2ª Edição, Oficina de Texto, São Paulo, 224p.
- Schroeder, G. S. (2006) *Análise Tectônica da Bacia do Itajaí*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 109p.