

Correlações Geotécnicas de Ensaios de Laboratório Com Ensaios de Campo em Solos de Cascavel-PR

Thays Car Feliciano de Oliveira

Eng.^a Civil Mestre em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, thayscarf@gmail.com

Thiago Bomjardim Porto

Docente Doutor em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, thiagoportoeng@gmail.com

RESUMO: Um dos grandes desafios para elaboração de projetos de fundações e contenções de obras urbanas é a definição adequada dos parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço geotécnico, uma vez que dificilmente são realizados ensaios geotécnicos especiais. Normalmente, uma das únicas informações disponíveis são as sondagens SPT (Standard Penetration Test), se existirem. Portanto, o objetivo deste trabalho foi elencar as correlações a partir de dados de N_{SPT} para estimativa de parâmetros de resistência do terreno mais aplicáveis para o contexto geotécnico do município de Cascavel-PR, onde o solo em geral é caracterizado como argila e argila siltosa (solos residuais de basalto). Para tanto, foram realizados ensaios triaxiais consolidados não drenados (CIU) em duas amostras distintas do município, nas tensões confinantes de 75, 150 e 300 kPa para obtenção da envoltória de ruptura e os resultados de coesão e ângulo de atrito foram comparados com as correlações de N_{SPT} . Ademais, as amostras também foram caracterizadas quanto a seus índices físicos, principalmente a granulometria, para confirmação da descrição tátil visual indicada nos boletins de sondagem SPT. As correlações da literatura mais aderentes aos parâmetros de resistência obtidos dos ensaios CIU foram as de Joppert Jr (2007) para a coesão e o ângulo de atrito em termos de tensões efetivas, bem como a de Berberian (2018) para a coesão efetiva. Para os parâmetros em termos de tensões totais, as correlações testadas de Teixeira (1996) e Godoy (1983) e Teixeira e Godoy (1996) apresentaram desvios de 30 a 80% e não são aplicáveis para o contexto estudado. Os resultados obtidos na pesquisa foram valiosos para compreensão de faixas de valores de resistência do solo coerentes para o local de estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica dos Solos, Ensaios triaxiais, Geotecnia, Projetos.

ABSTRACT: One of the greatest challenges in developing foundation and retaining walls projects for urban areas is the adequate definition of resistance and deformability parameters of the geotechnical mass, since special geotechnical tests are rarely carried out. Typically, only SPT reports are available, if they exist. Therefore, this work aims to list the correlations from N_{SPT} to estimate soil resistance parameters applicable to the geotechnical context of Cascavel-PR, where the soil in general is characterized as clay and silty clay (residual basalt soils). So undrained consolidated (CIU) triaxial tests were carried out on two different samples of the city, at confining pressures of 75, 150 and 300kPa in order to obtain failure envelopes and cohesion and friction angle results were compared to N_{SPT} correlations. In addition, the samples were also characterized in terms of their physical indices, mainly particle size, to confirm the visual tactile description indicated in the SPT reports. The most consistent correlations with the resistance parameters of the CIU tests were those of Joppert Jr (2007) for effective parameters, as well as Berberian (2018) to effective cohesion. For total parameters, Teixeira (1996), Godoy (1983) and Teixeira and Godoy (1996) correlations presented deviations from 30 to 80% and are not applicable to the studied context. The research results were valuable for understanding coherent ranges of soil resistance in the study site.

KEYWORDS: Soil Mechanics, Triaxial tests, Geotechnics, Projects.

1 INTRODUÇÃO

Os projetos geotécnicos são projetos naturalmente complexos devido à variabilidade natural dos maciços terrosos e rochosos, que podem ocorrer inclusive dentro de pequenos espaços amostrais. Portanto, as investigações de campo são essenciais e um pré-requisito para viabilizar os diferentes tipos de projetos geotécnicos: fundações, contenções, estabilização de encostas, estradas, entre outros (Shukla e Sivakugan, 2002).

Infelizmente, na prática, apesar da relevância do processo de investigação de campo, é comum que a única informação disponível sejam as sondagens SPT, devido a sua ampla disponibilidade, simples execução e baixo custo (Almeida e Oliveira, 2018; Shukla e Sivakugan, 2002). Neste caso, os projetistas utilizam correlações disponíveis na literatura para obtenção de alguns parâmetros específicos requeridos para cada tipo de projeto, por exemplo, no caso de contenções, os parâmetros de resistência (c , φ) e de deformabilidade (E , ν). Cabe ressaltar que estas definições de parâmetros devem ser embasadas em informações relevantes e validadas para as condições geológicas e geotécnicas em análise, ou seja, é recomendável que os parâmetros atribuídos sejam comparados a dados e experiências locais (Clayton *et al.*, 2013).

Não são raros os casos em que se fazem necessárias investigações complementares mais detalhadas após o início das obras, diante da ocorrência de situações não previstas. A exemplo, em obra de contenção para escavação de 31m no Rio de Janeiro (Ehrlich e Silva, 2015), as investigações iniciais que embasaram os projetos falharam em indicar uma camada de solo menos resistente e houve necessidade de investigações complementares, revisão do projeto, tomada de medidas urgentes de reforço e monitoramento contínuo da contenção durante o processo executivo.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi a apresentação de dados relativos aos parâmetros de resistência do solo em amostras de Cascavel-PR, visando identificar as correlações de N_{SPT} mais aplicáveis para a região, bem como contribuir para a geotecnia local.

2 METODOLOGIA

Este artigo caracteriza-se por um fragmento dos resultados da dissertação de Oliveira (2023), que realizou dois estudos de casos de obras de contenções atirantadas no município de Cascavel-PR. Aqui, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização e de resistência de amostras de solo extraídas de cada uma das obras, bem como comparações com correlações da literatura. Na Figura 1 apresentam-se os perfis de sondagem simplificados de cada uma das obras, em conjunto com a cota de extração das amostras.

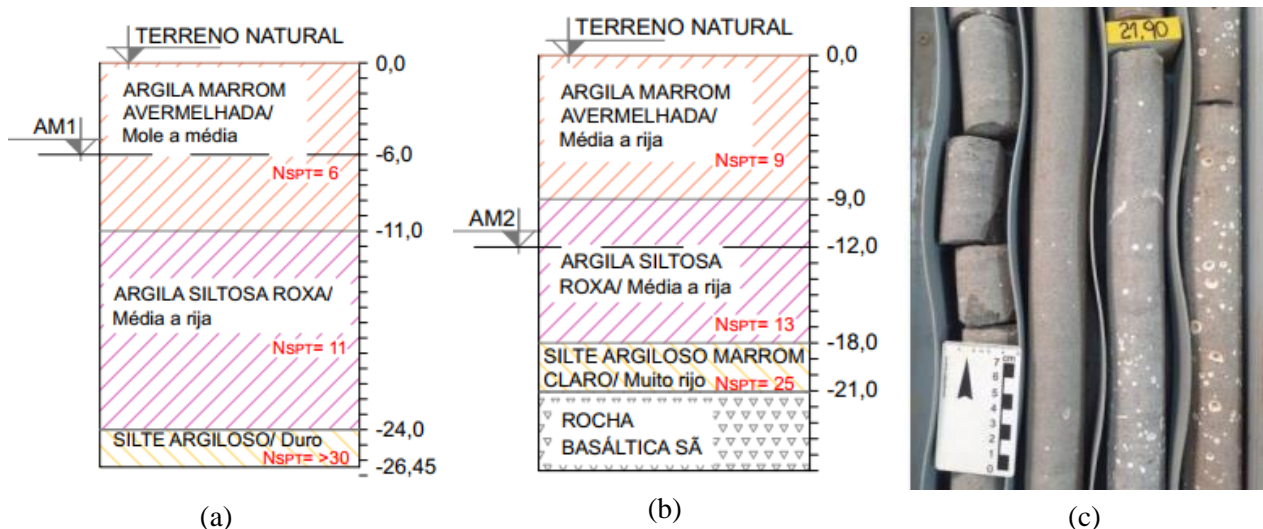


Figura 1. Perfis de sondagem simplificados (N_{SPT} médio por camada).

Amostras das obras (a) 1 (AM1) e (b) 2 (AM2). (c) Testemunho da rocha basáltica matriz, obra 2 (AM2).

A seção de metodologia deste trabalho está dividida em três etapas: (1) extração das amostras de solo das obras; e, realização dos ensaios (2) de caracterização e (3) triaxiais.

2.1 Extração das amostras

As amostras de solo foram extraídas de duas obras no município de Cascavel-PR, conforme prescrições da NBR 9604 (ABNT, 2016a). Tais amostras foram utilizadas para caracterização quanto aos índices físicos e parâmetros de resistência (por meio de ensaios triaxiais).

Para os ensaios triaxiais foram extraídas amostras indeformadas, blocos de 30x30x30cm, esculpidos em cotas de escavação próximas ao centro dos bulbos dos tirantes das estruturas de contenção. O processo pode ser observado na Figura 2.

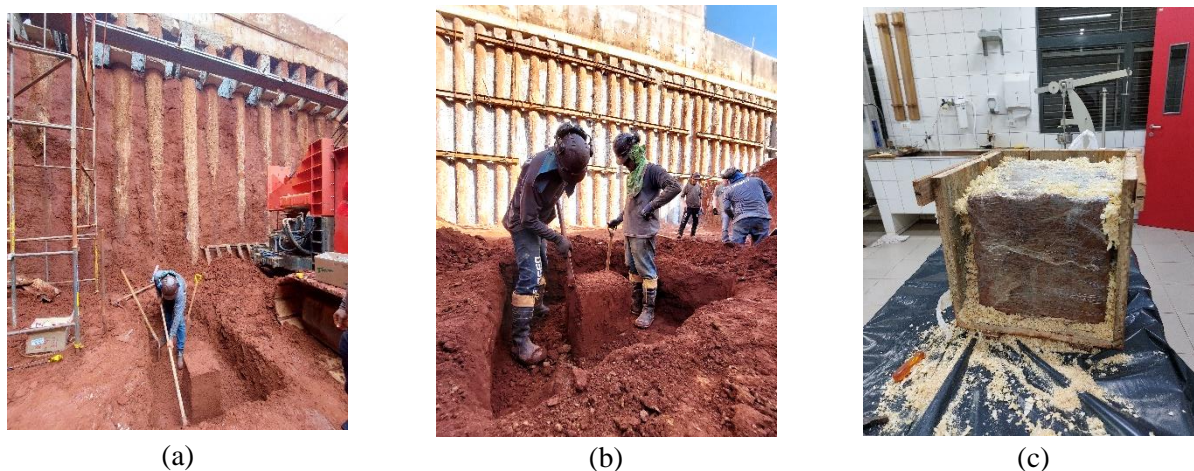


Figura 2. Extração das amostras indeformadas. (a) Amostra 1 (AM1). (b) Amostra 2 (AM2). (c) Armazenagem.

As amostras foram envoltas por filme plástico PVC e armazenadas em caixa de madeira, forrada com serragem. O bloco foi imediatamente transportado ao laboratório, onde em seguida foram iniciados os procedimentos de ensaio. A etapa de selagem com parafina indicada em norma foi suprimida.

Para os ensaios de caracterização foram obtidas amostras deformadas no entorno da região de extração do bloco indeformado (mesma profundidade), sendo estas acondicionadas em sacos plásticos e também imediatamente transportadas ao laboratório.

2.2 Ensaios de caracterização

A partir das amostras deformadas foram realizados ensaios de caracterização, visando confirmar a classificação tátil-visual fornecida nos relatórios de sondagem, bem como a obtenção dos parâmetros de massa específica dos grãos e peso específico aparente. Os ensaios realizados, bem como as normativas utilizadas são listados na Tabela 1.

Tabela 1. Ensaios de caracterização realizados nas amostras de solo.

Ensaio	Normativa
Preparo de amostras para caracterização	NBR 6457 (ABNT, 2016b)
Teor de umidade	NBR 6457 (ABNT, 2016b)
Limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016c)
Limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016d)
Granulometria	NBR 7181 (ABNT, 2016e)
Massa específica dos grãos ¹	NBR 6458 (ABNT, 2016f)
Peso específico natural ²	ASTM D7263-21 (ASTM, 2021)

¹ Anexo B da norma

² Em específico para este ensaio, utilizou-se amostra indeformada.

Todos os ensaios listados na Tabela 1 foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (FAG), em Cascavel-PR.

2.3 Ensaios triaxiais

Os ensaios triaxiais também foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário FAG em Cascavel-PR. O equipamento utilizado foi o triaxial estático tipo ar comprimido servo controlado I-1077, marca Pavistest, Contenco; prensa dotada de sistema servo controlado com indicação e controle de velocidade de avanço monitorado digitalmente, capacidade de até 5000 kg (50 kN) e quatro aplicadores de pressão de capacidade de 1000 kPa. O sistema de medição de deslocamentos desta prensa constitui-se de sensor de deslocamento linear (LVDT).

Optou-se pelo ensaio tipo CIU (Consolidated Isotropic Undrained), i.e., consolidado não drenado, tendo em vista o tipo de solo, argiloso e de permeabilidade baixa, que favorece o excesso de poropressões diante de carregamentos.

Para realização dos ensaios foram moldados corpos de prova (CPs) cilíndricos 5x10cm e o preparo e execução do ensaio foi realizado conforme ASTM D4767-11 (ASTM, 2020), nas três etapas principais de (i) saturação, (ii) consolidação e (iii) cisalhamento.

Devido a limitações de equipamento, não foi possível aplicar contrapressão na câmara, portanto na etapa de saturação aplicou-se fluxo ascendente de água no CP com tensão efetiva confinante de 30 kPa até passagem de um volume mínimo de 4 vezes o volume do CP. O adensamento foi realizado por período de cerca de 12h para cada CP, tempo suficiente para estabilização das medidas de variação de volume. Por fim, para o cisalhamento realizou-se aplicação de carga a velocidade de 0,1mm/min, com as pressões confinantes de 75, 100, 150 e 300 kPa. Maiores detalhes podem ser observados na dissertação de Oliveira (2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados na Tabela 2 e confirmam a descrição das sondagens SPT quanto à granulometria argilosa e/ou siltosa, com porcentagens passantes na peneira #200 (0,075mm) de cerca de 90% e 80% para os solos AM1 e AM2, respectivamente.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de caracterização para as amostras de solo. (Fonte: Oliveira, 2023).

Parâmetro	AM1	AM2
Limite de liquidez (LL)	66%	68%
Limite de plasticidade (LP)	60%	62%
Índice de plasticidade (IP)	6%	6%
Massa específica dos grãos (ρ_s)	2,90 g/cm ³	3,06 g/cm ³
Passante na peneira #200	92%	79%
Peso específico natural (γ)	16,0 kN/m ³	17,0 kN/m ³
Umidade natural (w)	54,0%	41,5%
Índice de vazios (e)	1,76	1,59
Porosidade (η)	64%	62%

Ademais, as curvas granulométricas das amostras são apresentadas na Figura 3. Observa-se que o solo da obra 1 (AM1) de fato trata-se de um solo predominantemente argiloso. Para a obra 2 (AM2) observa-se que as frações silte e argila apresentam porcentagens semelhantes. Na descrição da sondagem SPT, o solo nesta camada foi classificado como uma argila a argila siltosa.

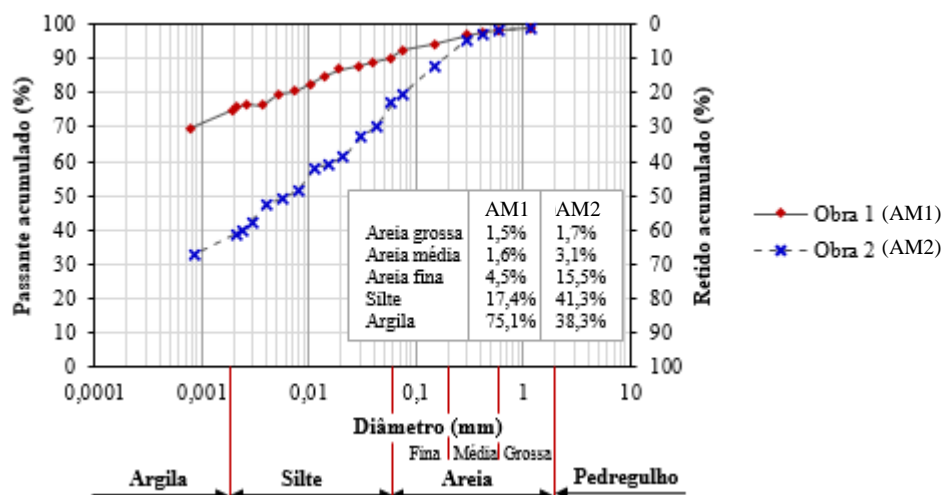


Figura 3. Curvas granulométricas. (Fonte: Oliveira, 2023).

Em geral, os parâmetros de caracterização obtidos para as amostras estão próximos ou dentro dos limites observados em outros trabalhos desenvolvidos na região de Cascavel-PR. Faixas de valores observadas na literatura (Zen e Almeida, 2018; Almeida et al., 2019; Venson et al., 2019; Venson e Sousa, 2020; Venson et al., 2020a; Venson et al., 2020b) foram de:

- Massa específica dos grãos entre 2,70 e 2,96 g/cm³;
- Fração argila entre 50 e 75%;
- Peso específico natural de 15 a 17,5 kN/m³;
- IP entre 8 e 24.

Em específico para os limites de consistência do solo, possivelmente os valores obtidos carregam erros observacionais ou aleatórios, correntes em experimentos laboratoriais.

Os resultados dos ensaios triaxiais podem ser observados na Figura 4 e na Figura 5.

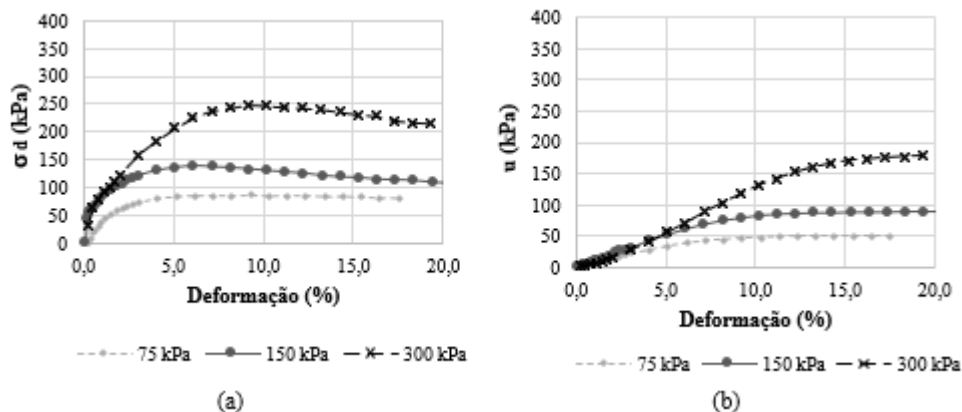


Figura 4. Resultados do ensaio triaxial para a AM1. (Fonte: Oliveira, 2023).
 (a) Tensão desviadora x Deformação. (b) Poropressões x Deformação.

Os resultados estão coerentes com o esperado para ensaios triaxiais CIU. Observa-se uma proporcionalidade entre os níveis de tensões desviadoras e poropressões à medida que o ensaio é realizado com maiores tensões confinantes, ou seja, quanto maior as tensões confinantes, maiores as tensões desviadoras e poropressões resultantes. Ademais, o solo AM2 apresentou níveis de tensão desviadora superior para uma mesma tensão confinante, ou seja, maior resistência. Isto pode ser explicado pela diferença de cotas de extração das amostras (AM1 extraída de -6,0m e AM2 -11,50m), ou também pela constituição e estrutura do solo (há uma diferença de composição granulométrica nas amostras).

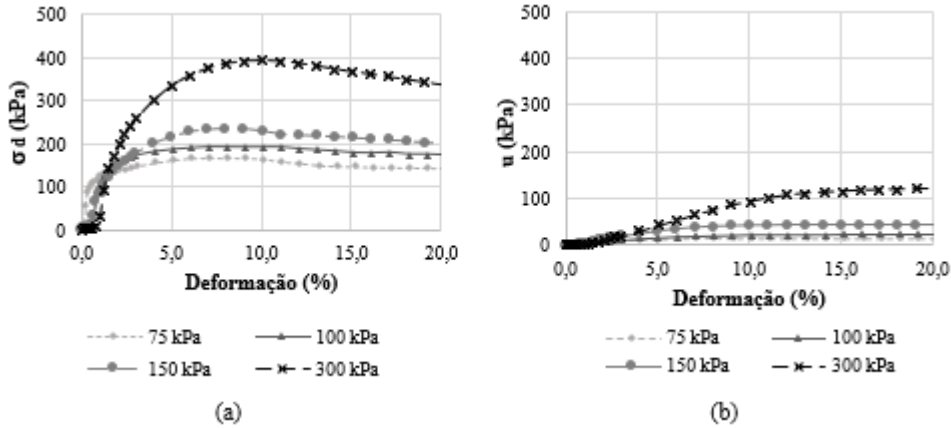


Figura 5. Resultados do ensaio triaxial para a AM2. (Fonte: Oliveira, 2023).
 (a) Tensão desviadora x Deformação. (b) Poropressões x Deformação.

A maior resistência da AM2 foi confirmada pelos parâmetros de resistência c e φ para cada uma das amostras, obtidos através das trajetórias de tensão, conforme Figura 6 e Figura 7.

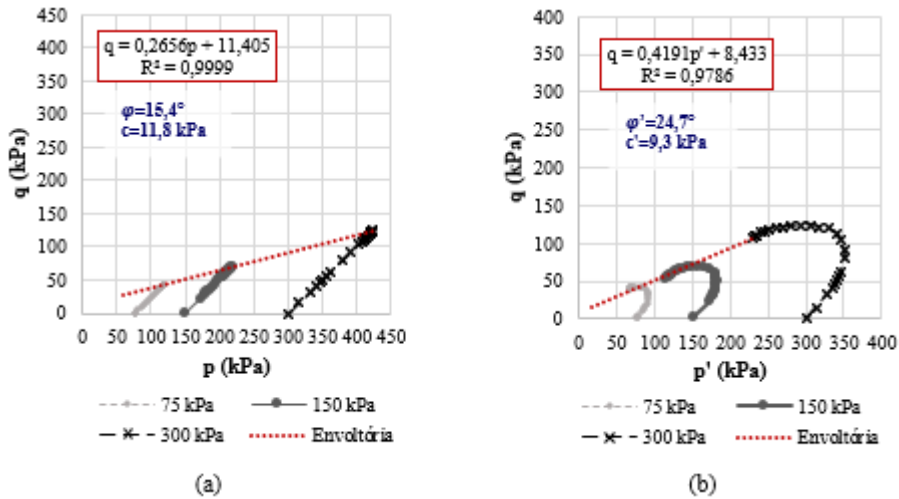


Figura 6. AM1. Trajetórias de tensão. (a) Totais. (b) Efetivas. (Fonte: Oliveira, 2023).

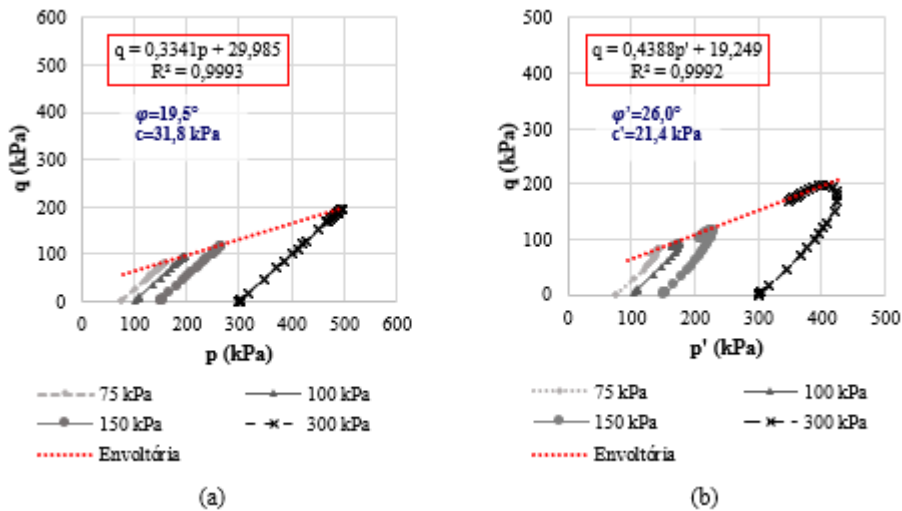


Figura 7. AM2. Trajetórias de tensão. (a) Totais. (b) Efetivas. (Fonte: Oliveira, 2023).

Os resultados são comparados à literatura, com trabalhos desenvolvidos a partir de amostras do mesmo município (Tabela 3). Observa-se que quando considerados os parâmetros efetivos, os valores de coesão divergem um pouco, mas o ângulo de atrito resultou em valores semelhantes. Ao considerar os parâmetros em termos de tensões totais, os valores obtidos neste trabalho estão dentro da faixa de valores encontrada na literatura.

Tabela 3. Resultados dos parâmetros de resistência comparados à literatura. (Fonte: Oliveira, 2023).

Descrição	Obra 1	Obra 2	Literatura ¹
Tensões efetivas	$c'=9,3$ kPa $\varphi'=24,7^\circ$	$c'=21,4$ kPa $\varphi'=26,0^\circ$	$c'=31,0$ kPa $\varphi'=25,0^\circ$
Tensões totais	$c=11,8$ kPa $\varphi=15,4^\circ$	$c=31,8$ kPa $\varphi=19,5^\circ$	$c=2$ kPa a 64 kPa $\varphi=14,1^\circ$ a $30,4^\circ$

¹ Para tensões efetivas: Venson *et al.* (2019) // Para tensões totais: Almeida e Oliveira (2018)

Por fim, os resultados também foram comparados à algumas correlações da literatura, aplicáveis para solos argiloso e argilo-siltosos, conforme apresentado na Tabela 4 e na Tabela 5.

Tabela 4. Comparação dos resultados de φ e φ' com correlações. (Fonte: Oliveira, 2023).

	N_{SPT} médio ¹	φ			φ'		
		Triaxial dissertação	Godoy (1983)	Teixeira (1996)	Triaxial dissertação	Joppert (2007)	Jr.
Obra 1	6 (4 a 8)	15,4°	30,4°	26°	24,7°	23 a 25°	
Obra 2	9 (5 a 12)	19,5°	31,6°	28,4°	26,0°	25°	

¹ Na cota de extração da amostra indeformada.

Tabela 5. Comparação dos resultados de c e c' com correlações. (Fonte: Oliveira, 2023).

	N_{SPT} médio ¹	c (kPa)		c' (kPa)		
		Triaxial dissertação	Teixeira e Godoy (1996)	Triaxial dissertação	Berberian (2018) ²	Joppert (2007)
Obra 1	6 (4 a 8)	11,8	60	9,3	17,1	15 – 30
Obra 2	9 (5 a 12)	31,8	90	21,4	25,7	30 – 70

¹ Na cota de extração da amostra indeformada. // ² Citado no trabalho de Pereira (2022).

A partir das comparações realizadas na Tabela 4 e Tabela 5, observa-se um desvio considerável entre os resultados obtidos por meio de ensaios triaxiais e as correlações utilizadas no caso de parâmetros para tensões totais. Para o ângulo de atrito, os resultados laboratoriais diferiram de 30 a 50% das correlações, enquanto para a coesão, de 60 a 80%. Ou seja, as correlações de Godoy (1983) e Teixeira (1996) para φ e de Teixeira e Godoy (1996) para a coesão não seriam adequadas para solos com as características apresentadas neste trabalho, observação distinta ao que foi apresentado por Almeida e Oliveira (2018).

Por outro lado, no caso de parâmetros efetivos, as correlações utilizadas de Joppert Jr. (2007) para φ' e c' e de Berberian (2018) para c' são mais coerentes com a realidade observada nos ensaios.

Na dissertação de Oliveira (2023) também foram estudadas correlações para o módulo de deformabilidade das amostras, que podem ser consultadas no texto na íntegra.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentou-se um fragmento da dissertação de Oliveira (2023), no qual pôde-se verificar os resultados de caracterização e de resistência para amostras de solo argiloso e argilo-siltoso de Cascavel-PR, solos residuais do basalto da Serra Geral Centro-Norte, Formação Paranapanema. Os resultados de resistência (φ e φ' , c e c') foram comparados à correlações da literatura. Observou-se que:

- Os parâmetros de resistência obtidos estão de acordo com o esperado para amostras argilosas e argilo-siltosas, com base em comparações com a literatura.
- Uma comparação dos resultados com correlações de sondagens SPT indica que as correlações de Godoy (1983) e Teixeira (1996) para φ e Teixeira e Godoy (1996) para coesão não são adequadas para solos

com as características apresentadas neste trabalho. As correlações mais coerentes foram as de Joppert Jr. (2007) para o φ' e de Berberian (2018) e Joppert Jr. (2007) para a coesão efetiva.

Em suma, os resultados obtidos no decorrer desta pesquisa foram satisfatórios no sentido de auxiliar em definições básicas de faixas de resistência coerentes para o solo da região. Ademais, estudos mais extensivos para compreensão da aplicabilidade de cada tipo de correlação com o N_{SPT} são necessários, tendo em vista a divergência entre as observações realizadas a partir deste trabalho, em comparação com outros da região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) na viabilização deste artigo; ao Centro Universitário FAG pela disponibilização do espaço e equipamentos do Laboratório de Mec. Solos; à Fungeo Fundações e Geologia pelo suporte para retirada das amostras; e, ao prof. Guilherme Venson da UNIOSTE (Cascavel) pelo suporte técnico para realização dos ensaios triaxiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M.A.A., e Oliveira, R.M.M. (2018). Estimativa do ângulo de atrito e coesão através de índices de resistência obtidos pela sondagem SPT em solo laterítico e colapsível característico da cidade de Cascavel no estado do Paraná. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Cobramseg, Salvador. *Anais... ABMS*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016a). NBR 9604. *Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2016b). NBR 6457. *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2016c). NBR 7180. *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro
- ABNT (2016d). NBR 6459. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2016e). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT (2016f). NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2021). ASTM D7263-21: *Standard test methods for determination of density and unit weight of soil specimens*. West Chonshohocken.
- ASTM International (2020). D4767-11: *Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils*. West Chonshohocken.
- Oliveira, T. C. F. (2023). *Desempenho geotécnico de cortinas atirantadas executadas em Cascavel-PR*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, UFOP. 132 p. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/17467>>.
- Pereira, D. M. (2022). *Retroanálise de talude rodoviário – abordagens determinísticas e probabilística*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, UFOP. 121 p.
- Shukla, S. K., Sivakugan, N. (2002). *Site investigation and In Situ Tests – chapter 10*. In: Das, B.M (eds). *Geotechnical Engineering Handbook*. J.Ross Publishing, Florida, USA.
- Venson, G.I., e Sousa, P.G.B. (2020). Razão porosidade/teor volumétrico na estimativa do comportamento mecânico de um solo argiloso tratado com cal. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cobramseg. Campinas. *Anais... ABMS*.
- Venson, G.I., Sousa, P.G.B., e Mota, A.L.F. (2020a). Uso da Razão Porosidade por Teor Volumétrico na Estimativa do Comportamento Mecânico de um solo argiloso com adição de cimento. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Cobramseg. Campinas. *Anais... ABMS*.
- Venson, G.I., Sousa, P.G.B., Moura, J.P. (2020b). Influência da razão porosidade/teor volumétrico na variação do módulo de elasticidade de uma argila melhorada com cal. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Cobramseg, Campinas. *Anais... ABMS*.
- Venson, G. I. et al. (2019). Estudo de caso: análise de estabilidade de talude em uma ruptura com soterramento em Cascavel/PR. In: X Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul – GEORS, Santa Maria. *Anais... UFSM*.
- Zen, B.A.B., e Almeida, M.A. (2018). Implantação e caracterização geotécnica do campo experimental de engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel/PR. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Cobramseg, Salvador. *Anais... ABMS*.