

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA INTERFACE SOLO-CALDA DE CIMENTO: COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO

Juliana Maria Félix de Lima

Mestre em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos,
EESC-USP, São Carlos, SP, e-mail: julianamariafelix@gmail.com

Benedito de Souza Bueno

Professor-doutor, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP,
São Carlos/SP, e-mail: bsbueno@sc.usp.br

Resumo

Este trabalho avalia a previsão da resistência ao cisalhamento da interface solo-calda que foi avaliada experimentalmente por meio de ensaios de cisalhamento direto realizados em laboratório. Esses ensaios permitiram uma análise dos parâmetros de resistência dos solos (c' e ϕ') e das interfaces solo-calda de cimento. Os valores de resistência ao cisalhamento de interface obtida em laboratório apresentaram resultados próximos aos valores de campo, obtidos a partir da realização dos ensaios de arrancamento em obras distintas.

Palavras-chave: solo grampeado, resistência ao cisalhamento de interface, parâmetros de resistência.

Introdução

Dentre as técnicas de reforço, o solo grampeado tem se destacado em âmbito mundial em virtude de sua versatilidade e eficiência na estabilização de taludes de escavação por meio do reforço do solo *in situ*, através da introdução de grampos no meio a ser estabilizado. Nas técnicas de instalação dos grampos, destaca-se aquela em que estes elementos são introduzidos em furo pré-executado, com posterior injeção de nata de cimento. Uma vez concluída a instalação dos grampos em uma bancada, executa-se a face nessa zona com o lançamento de concreto projetado ou possível vegetação, a fim de proteger a face e evitar processos erosivos.

O preenchimento do furo efetivado durante a fase executiva de uma obra de solo grampeado é realizado com calda de cimento, a qual recebe o nome de “bainha”. Zirlis *et al.* (1992) definem a bainha como sendo a fase inicial de injeção em que se pretende recompor a cavidade escavada. Nos casos em que se pretende promover o preenchimento dos vazios causados pela exsudação da bainha, é realizada uma segunda injeção (Bainha + 1 fase). Durante essa fase de reinjeção é possível controlar o volume da calda de cimento injetado e a pressão de injeção (Pitta *et al.*, 2003).

Os parâmetros envolvidos nos projetos de solo grampeado relacionam-se com os solos do local da obra e com elementos como grampos, revestimento da face e sistema de drenagem (França, 2007). Um dos parâmetros mais importantes é a resistência ao cisalhamento existente

na interface solo-grampo, pois é dessa interação que os esforços do solo são transferidos para os grampos. Esse parâmetro é obtido por meio de ensaios de arrancamento ou por correlações empíricas propostas por alguns autores, como Clouterre (1991) ou Ortigão (1997), por exemplo.

Os ensaios de arrancamento são os mais utilizados para determinar a resistência ao cisalhamento resultante da interação solo/grampo, pois a partir desses ensaios é possível obter a carga máxima de arrancamento, a carga residual, entre outros parâmetros. No entanto, esses ensaios devem ser realizados durante a execução das obras, sendo necessário, muitas vezes, o uso de estimativas da resistência por atrito lateral, com base em correlações empíricas para a fase de projeto.

Este trabalho apresenta resultados da resistência ao arrancamento de grampos instalados em duas obras, com base em parâmetros de resistência do solo e da interface solo/calda de cimento, ambos obtidos por meio de ensaios laboratoriais. Para efetuar essa comparação foram realizados ensaios de caracterização e ensaios de cisalhamento direto do solo e cisalhamento da interface solo/calda de cimento. Por fim, os resultados são comparados com os ensaios de arrancamento realizados por Pacheco e Silva (2009). Justifica-se essa previsão, pois as amostras utilizadas nos ensaios eram indeformadas e foram retiradas em locais próximos de onde eram executados os ensaios de arrancamento realizados.

Materiais e Métodos

A seguir serão apresentadas as obras de solo grampeado, das quais foram retiradas as amostras para realização desta pesquisa, assim como os ensaios realizados com o solo desses locais.

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto na umidade natural. As tensões verticais do ensaio de cisalhamento direto foram de 35, 100 e 200 kPa para o solo de Santo André e 25, 50 e 100 kPa para o solo de Osasco. Essas tensões foram adotadas de modo a serem compatíveis com as tensões verticais atuantes sobre os grampos executados.

Caso de Obra 1 – Santo André, SP

Trata-se de uma obra em que a técnica de solo grampeado foi utilizada para a contenção de uma escavação vertical realizada para implantação de subsolos de um edifício. As amostras foram coletadas próximo aos grampos experimentais realizados por Pacheco e Silva, na profundidade de 1,80 m (2ª linha de grampos – linha 2) e na profundidade de 5,3 m (5ª linha de grampos – linha 5). A Figura 1 ilustra o perfil do solo dessa obra, o SPT obtido e as profundidades de retirada das amostras.

Quanto à gênese do solo, o solo da linha 2 apresenta características semelhantes às dos solos residuais jovens. Já o solo da linha 5 é caracterizado por gênese saprolítica. As amostras de solo coletadas em cada linha de grampo foram submetidas a ensaios de caracterização geotécnica em laboratório e estão sintetizadas no Quadro 1.

Caso de Obra 2 – Osasco, SP

Trata-se de uma obra em que a técnica de solo pregado foi utilizada para conter uma escavação realizada para implantação de um edifício comercial. Os grampos instrumentados foram executados por Pacheco e Silva (2009) nas profundidades de 2,72 m (3ª linha de grampos – linha 3) e 4,76 m (5ª linha de grampos – linha 5). As amostras foram coletadas próximo ao local de instalação desses grampos e submetidas a ensaios de caracterização em laboratório (Quadro 2). O perfil desse solo e o SPT obtido, assim como a profundidade de coleta das amostras, estão esquematizados na Figura 2. Quanto à gênese dos solos em estudo, os solos da cidade de Osasco se assemelham aos de Santo André, sendo o solo da linha 3 caracterizado como residual jovem e o solo da linha 5, saprolítico. As amostras de solo coletadas em cada linha de grampo foram submetidas a ensaios de caracterização geotécnica em laboratório e estão sintetizadas no Quadro 2.

Ensaio Realizados

Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos prescritos na ASTM D 3080. Os corpos de prova medem aproximadamente 25 mm de altura e 100 mm de largura e foram moldados a partir das amostras indeformadas coletadas durante a execução da obra. Este ensaio tem por objetivo avaliar os parâmetros de resistência do solo (c e ϕ) e compará-los com os parâmetros obtidos com o ensaio de cisalhamento de interface.

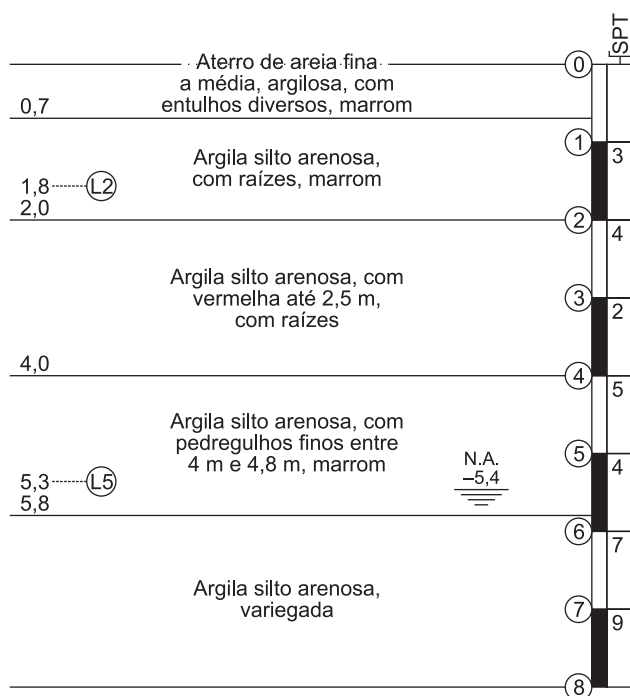
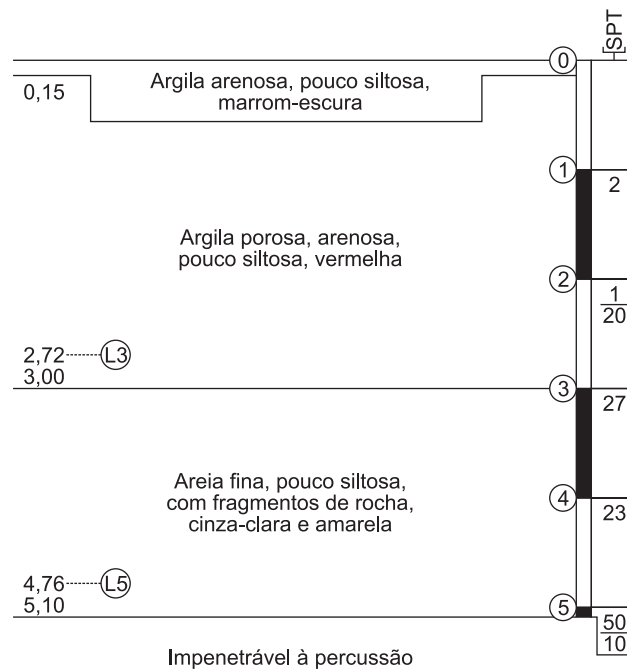


Figura 1 Perfil do solo da obra de Santo André.

Quadro 1 Características geotécnicas e classificação do solo da obra de Santo André.

Propriedade	Solo 1 (Linha 2)	Solo 2 (Linha 5)
ρ_s (g/cm ³)	2,798	2,817
ρ (g/cm ³)	1,71	1,95
ρ_d (g/cm ³)	1,31	1,62
w (%)	31,0	20,3
% argila	46,8	38,7
% silte	18,2	16,3
% areia	35,0	45,0
LL	48	56
LP	27	32
e	1,13	0,74
n	53,2	42,5
Classificação	Argila arenosa	Areia argilosa

**Figura 2** Perfil do solo da obra de Osasco.

Ensaio de cisalhamento de interface

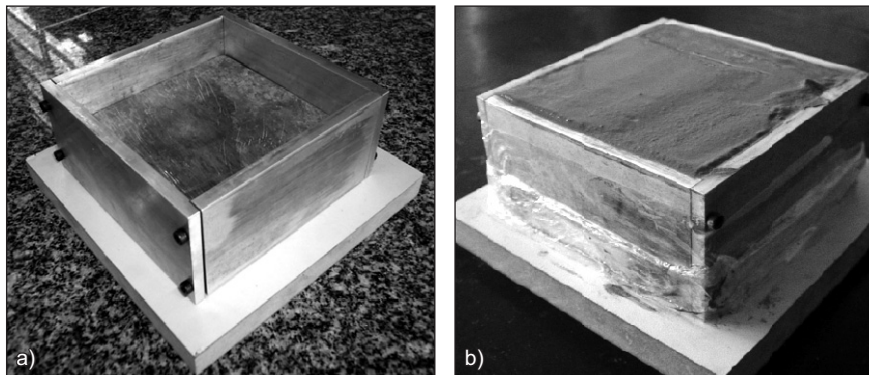
Os corpos de prova do ensaio de cisalhamento de interface foram moldados de forma idêntica aos do ensaio de cisalhamento direto (ASTM D 3080). Foram depois armazenados dentro da caixa de moldagem, confeccionada com dimensões aproximadas do anel de moldagem (Figura 3a). Uma calda de cimento, com fator água/cimento 0,6 (semelhante ao traço utilizado na obra), foi em seguida

distribuída sobre a superfície de solo já existente na caixa de moldagem (Figura 3b). As amostras foram mantidas em câmara úmida até a data da ruptura.

O procedimento de ensaio é semelhante ao do ensaio de cisalhamento direto e consiste em deslocar a camada inferior do corpo de prova (calda de solo-cimento) em relação à camada superior (solo), garantindo assim que a ruptura realmente ocorra na interface existente entre as camadas.

Quadro 2 Características geotécnicas e classificação do solo da obra de Osasco.

Propriedade	Solo 1 (Linha 2)	Solo 2 (Linha 5)
ρ_s (g/cm ³)	2,649	2,632
ρ (g/cm ³)	1,44	1,81
ρ_d (g/cm ³)	1,17	1,39
w (%)	23,1	30,3
% argila	44,8	42,5
% silte	15,2	12,5
% areia	40,0	45,0
LL	56	54
LP	33	31
e	1,26	0,89
n	55,8	47,2
Classificação	Argila arenosa	Areia argilosa

**Figura 3** (a) Corpo de prova armazenado na caixa de moldagem e (b) preenchimento da caixa com calda de cimento.

Resultados e Análises

Obra 1 – Santo André, SP

Ensaio de cisalhamento direto do solo

Por meio do ensaio de cisalhamento direto do solo foi possível obter os parâmetros de resistência (c e ϕ), a tensão cisalhante máxima e a variação volumétrica em cada tensão normal (Figura 4). Para o solo da linha 2, foi obtida uma coesão de 29,3 kPa e ângulo de atrito de 31,5°. Como esperado, o solo da linha 5 apresenta maiores parâmetros de resistência, em virtude de sua maior compactidade e gênese saprolítica. Nesse solo os parâmetros obtidos foram uma coesão de 34,6 kPa e ângulo de atrito de 34,6°.

O solo da linha 2 (argila arenosa) apresenta um pico pouco pronunciado somente para a tensão normal de 35 kPa (Figura 4a), sendo que a variação de volume nessa tensão apresenta pequena redução inicial seguida de expansão volumétrica à medida que o solo se deforma.

Esse comportamento é típico de argilas sobreadensadas. Sob tensões normais superiores (100 e 200 kPa), não ocorre pico e há redução de volume durante o cisalhamento, típico de um solo normalmente adensado. Esse tipo de ruptura é denominado de ruptura plástica, em que as tensões crescem até uma tensão limite e a partir daí as deformações continuam a crescer, praticamente sem variação de tensões.

O solo da linha 5 (areia argilosa) apresentou comportamento característico de um solo sobreadensado, em que após atingir um pico ocorre redução da resistência, que se encaminha a um valor constante para deformações elevadas.

Ensaio de cisalhamento de interface

Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias nas Figuras 5, 6 e 7, respectivamente.

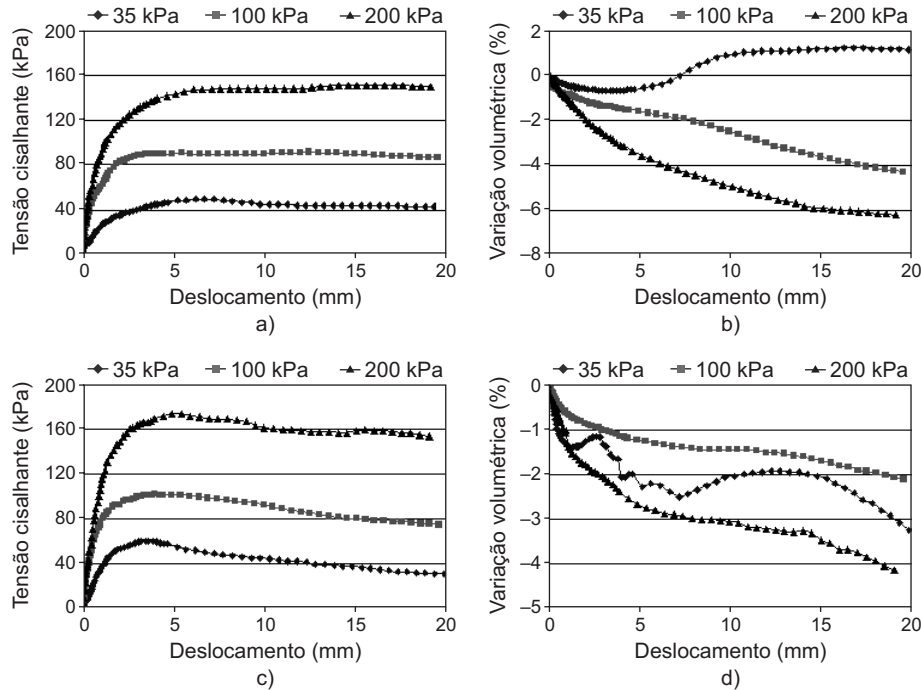


Figura 4 Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento para os solos da linha 2 (a) e da linha 5 (b) e curvas variação volumétrica *versus* deslocamento para os solos da linha 2 (c) e da linha 5 (d).

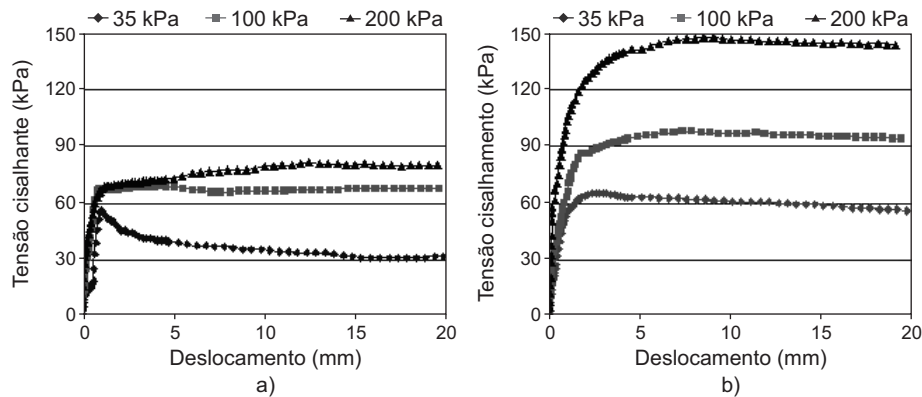


Figura 5 Resultados obtidos para tempo de cura de 7 dias: (a) curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento para os solos da linha 2 e (b) da linha 5.

No tempo de cura de 7 dias, as tensões cisalhantes máximas obtidas para o solo da linha 2 apresentaram pouca variação com o aumento das tensões normais (Figura 5a e b), resultando em baixo ângulo de atrito de interface e elevada coesão. O comportamento da interface no período de 7 dias é dominado pelo solo, pois o cimento aparentemente tem ainda pouco tempo de cura e conseqüentemente baixa resistência.

O cisalhamento de interface do solo saprolítico da linha 5 apresentou maiores tensões de cisalhamento, quando comparado ao da linha 3 e, logo, maiores resistências ao cisalhamento. Parte desse comportamento pode ser creditado ao fato de esse solo ser areia, enquanto o solo da linha 2

(solo residual) é predominantemente argila porosa (Figura 5a e b). No período de 14 dias, os dois solos apresentaram pequena variação na tensão cisalhante para as tensões normais de 35 e 100 kPa. Já com relação às tensões de 200 kPa houve considerável aumento na tensão cisalhante. Isto resulta em maior resistência ao cisalhamento (Figura 6).

Nesse período as curvas apresentaram picos mais pronunciados, pois a calda de cimento está com considerável endurecimento e a ruptura, neste caso, ocorre de forma frágil, com rompimento súbito ao chegar a determinada tensão. O Quadro 3 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento de interface realizados para a obra de Santo André.

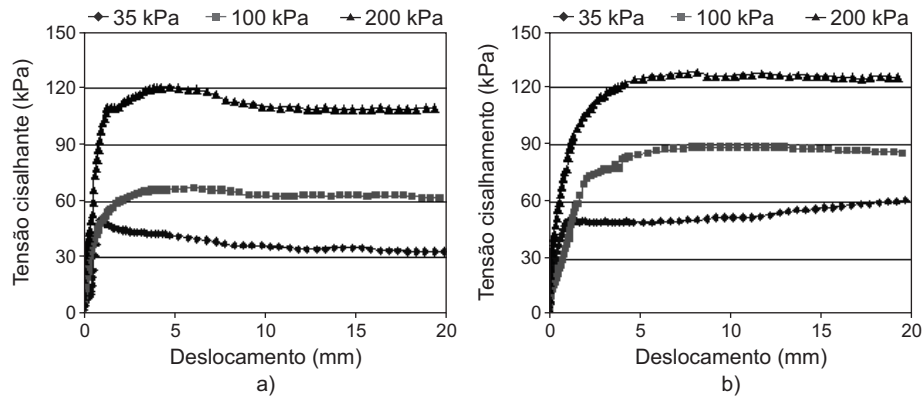


Figura 6 Resultados obtidos para tempo de cura de 14 dias: (a) curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento para os solos da linha 2 e (b) da linha 5.

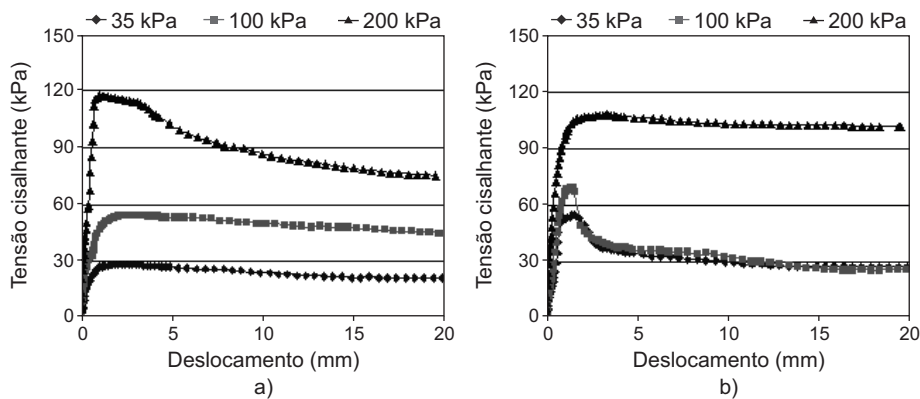


Figura 7 Resultados obtidos para tempo de cura de 28 dias: (a) curva da tensão cisalhante *versus* deslocamento para os solos da linha 2 e (b) da linha 5.

Quadro 3 Parâmetros do ensaio de cisalhamento de interface da obra de Santo André.

Tempo (dias)	Linha 2		Linha 5	
	c (kPa)	(°)	c (kPa)	(°)
7	51,82	8,6	48,01	26,4
14	30,15	23,6	47,02	22,1
28	5,76	28,7	41,38	18,0

Pode-se verificar com os resultados apresentados no Quadro 5 que, para ambos os solos, a coesão diminuiu com o aumento do tempo de cura. Esse decréscimo de coesão é mais acentuado aos 28 dias.

A Figura 8 mostra que, de forma geral, para ambos os solos, as tensões cisalhantes não sofreram grandes variações ao longo do tempo, para 7 a 14 dias, para as tensões normais de 35 e 100 kPa. Além disso, esses valores situam-se próximos dos valores da tensão de cisalhamento máxima obtidos no ensaio de cisalhamento direto. Como ao longo desse período

a resistência do cimento é aparentemente ainda “baixa”, a resistência ao cisalhamento é dominada pelo solo. Em todos os casos a tensão cisalhante máxima reduz-se aos 28 dias se comparada com os outros tempos de cura.

Obra 2 – Osasco, SP

Ensaio de cisalhamento direto do solo

Com o intuito de obter os parâmetros de resistência da linha 3 e da linha 5, foram realizados ensaios de cisalhamento direto. O solo da linha 3 obteve coesão de 12,9 kPa e 38,8°

de ângulo de atrito, e o solo da linha 5 resultou em coesão de 26,8 kPa e ângulo de atrito de 38,9°. Assim como nos solos de Santo André, os parâmetros obtidos no solo da linha 5 são maiores do que os do solo da linha 3. Isto se deve às diferenças entre a gênese desses solos, ou seja, enquanto o solo da linha 3, mais superficial, foi classificado como argila arenosa e de natureza porosa, o solo da linha 5 foi classificado como areia argilosa e de natureza saprolítica.

O solo da linha 3 é argila arenosa porosa. As curvas resultantes dos ensaios de cisalhamento, sob diferentes tensões normais, não apresentaram pico. Portanto, o critério de ruptura empregado foi definido a partir das deformações de 15 a 20%.

O solo da linha 5, sob tensões normais de 25 e 50 kPa, apresenta pico definido quando se atinge determinada tensão cisalhante. No entanto, para a tensão de 100 kPa,

o solo apresenta uma curva com comportamento plástico, sem um pico definido.

Ensaio de cisalhamento de interface

Assim como na obra 1, foram realizados ensaios de cisalhamento de interface, cujos resultados são apresentados pelas curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento e envoltórias de resistências, nos devidos tempos de cura. (Figuras 10 a 12).

Para o tempo de cura de 7 dias, as tensões cisalhantes não sofrem grandes variações com o aumento da tensão normal, sendo esses valores inferiores aos obtidos no cisalhamento do solo. No caso do solo da linha 3, por se tratar de um solo poroso, observou-se inclusive reduções nos valores de tensões cisalhantes quando comparados aos valores do solo apenas.

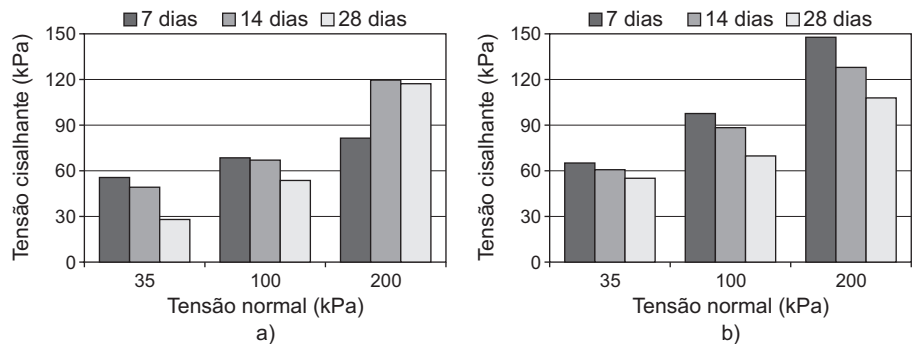


Figura 8 Variação da tensão de cisalhamento no tempo para a obra de Santo André: (a) solo da linha 2 e (b) solo da linha 5.

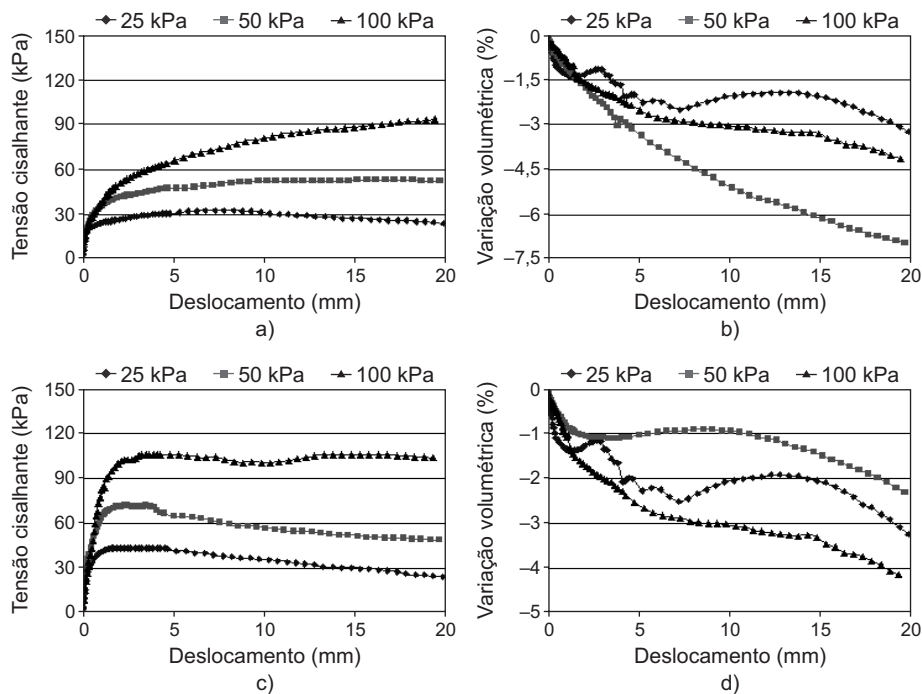


Figura 9 Curva tensão cisalhante *versus* deslocamento para os solos da linha 3 (a) e da linha 5 (b) e curva de variação volumétrica *versus* deslocamento para os solos da linha 3 (c) e da linha 5 (d).

No solo da linha 3, as tensões cisalhantes sofreram pequenas variações em relação ao período de 7 dias. Já no solo da linha 5 os valores aumentaram consideravelmente, principalmente para a tensão de 100 kPa. Esse acréscimo pode ser causado, entre outros fatores, pela heterogeneidade desse solo, de origem saprolítica, por conter partes mais

resistentes que outras. Como já previsto, as tensões cisalhantes máximas reduziram-se aos 28 dias, para os dois solos estudados, em todas as tensões normais analisadas. O Quadro 4 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento de interface realizados para a obra de Osasco.

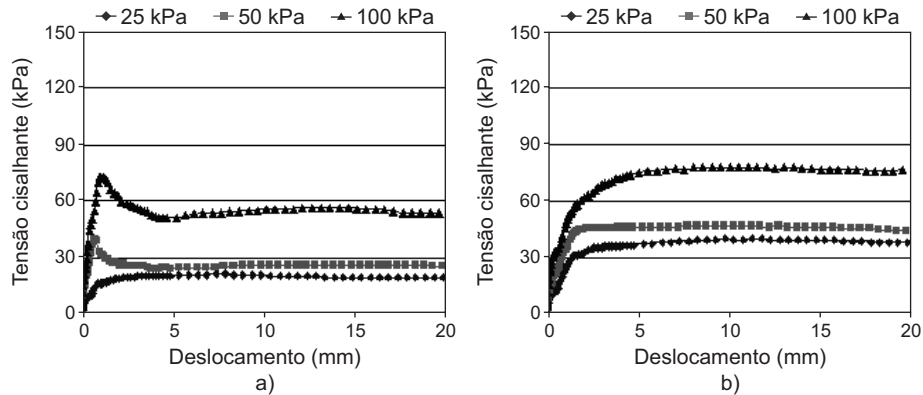


Figura 10 Resultados obtidos para tempo de cura de 7 dias: (a) curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento para os solos da linha 3 e (b) da linha 5.

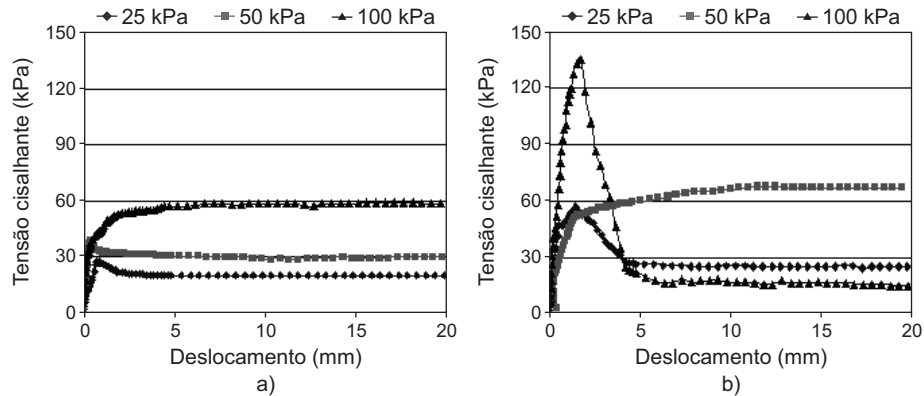


Figura 11 Resultados obtidos para tempo de cura de 14 dias: (a) curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento para os solos da linha 3 e (b) da linha 5.

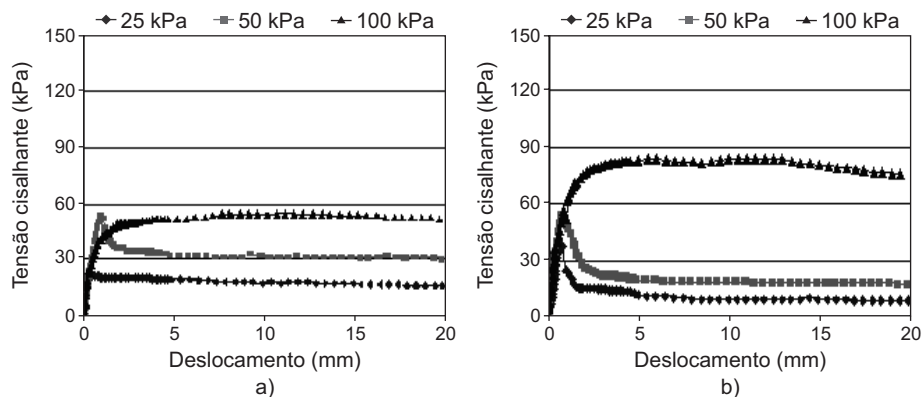


Figura 12 Resultados obtidos para tempo de cura de 28 dias: (a) curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento para os solos da linha 3 e (b) da linha 5.

Uma análise dos resultados apresentados no Quadro 4 permite concluir que a coesão do solo da linha 3 aumentou com o tempo de cura, mas esses valores são considerados baixos em todos os casos. Isso se deve à baixa consistência desse solo causada por sua elevada porosidade, que permite o aumento considerável da umidade da camada de solo durante o tempo de cura da calda de cimento.

Por se tratar de um solo de origem saprolítica e de maior peso específico, o solo da linha 5 apresentou maiores parâmetros de resistência durante o estudo. No entanto, por ser um solo bastante heterogêneo, os valores apresentam algumas variações nos resultados.

A Figura 13 mostra a variação da tensão de cisalhamento com o tempo de cura. Pode-se perceber que, ao longo do tempo, o solo da linha 3 apresentou baixa resistência ao cisalhamento, com pouca variação no período de 7 a 14 dias para as tensões de 25 e 50 kPa. Esses valores baixos se devem ao relativamente menor peso específico desse solo, certamente em virtude de sua elevada porosidade.

Já o solo da linha 5 apresentou resistência mais elevada ao cisalhamento, principalmente no período intermediário de 14 dias. Como em todos os casos, aos 28 dias, reduziu-se o valor da tensão de cisalhamento em virtude da redução na interação das partículas de argilas com a superfície da calda, diminuindo assim o valor da coesão.

Ensaio de Campo x Ensaio de Laboratório

Pacheco & Silva (2009) realizou ensaios de arrancamento nas obras de onde foram retiradas as amostras desta pesquisa e avaliou a influência de diferentes métodos executivos na resistência ao cisalhamento da interface solo-reforço (q_s) de duas estruturas de solo grampeado. Os métodos executivos se diferenciavam entre si no comprimento dos grampos (curtos e longos) e nas fases de injeção (bainha, bainha + 1 fase de reinjeção, bainha + 2 fases de reinjeção). Os grampos curtos foram construídos com 4,0 m de comprimento, sendo 3,0 m injetados e 1,0 m de trecho livre, enquanto os reforços longos foram construídos com 7,0 m de comprimento, sendo 6,0 m injetados e 1,0 m de trecho livre. Para a execução dos grampos foram utilizadas barras de aço CA-50 de 25 mm de diâmetro.

A Figura 14 ilustra uma análise comparativa da metodologia A de Pacheco & Silva (2009) com os resultados obtidos em laboratório. Nessa metodologia, o grampo curto é executado somente com a bainha. As análises foram realizadas para os solos da linha 2 e da linha 5 de Santo André (SA-L2 e SA-L5) e para os solos da linha 3 e da linha 5 de Osasco (OSA-L3 e OSA-L5).

Os resultados obtidos em campo e em laboratório mostraram-se bem próximos para os casos analisados, com exceção do caso da linha 5 de Santo André e o da linha 3 de Osasco.

Quadro 4 Parâmetros do ensaio de cisalhamento de interface da obra de Osasco.

Tempo (dias)	Linha 3		Linha 5	
	c (kPa)	(°)	c (kPa)	(°)
7	4,92	34,4	24,42	27,8
14	17,92	22,6	23,65	47,21
28	11,92	23,6	23,31	31,31

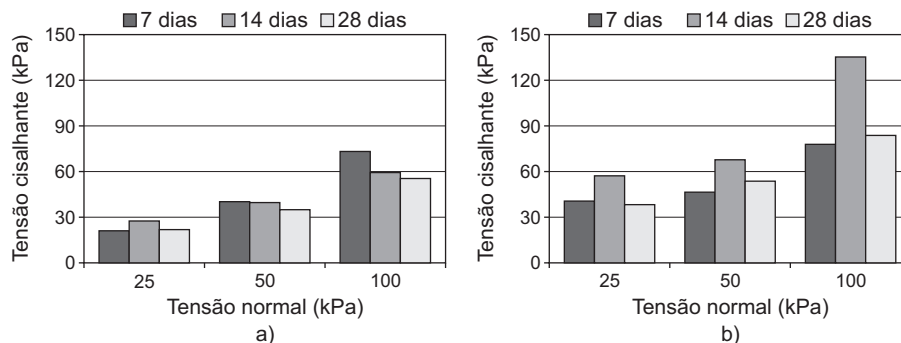


Figura 13 Variação da tensão de cisalhamento ao longo do tempo para a obra de Osasco: (a) solo da linha 3 e (b) solo da linha 5.

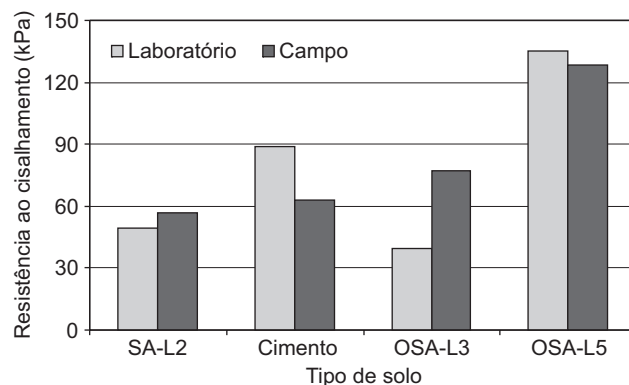


Figura 14 Análise comparativa dos resultados obtidos em campo e laboratório.

O solo da linha 5 de Santo André é saprolítico bastante heterogêneo. A diferença entre os valores obtidos em campo e laboratório se deve ao fato de o solo existente nas proximidades do grampo ser uma camada com resistência inferior à amostra de solo analisada em laboratório. Além disso, a bainha deixa eventuais vazios no grampo durante sua execução, o que pode ter reduzido os valores de q_s em campo. Essa hipótese pode ser confirmada ao se verificar que nesse caso os valores obtidos em laboratório são mais próximos da metodologia B (bainha + 1 reinjeção) cujo valor da resistência ao cisalhamento de interface é de 114 kPa.

Ainda, analisando a Figura 14, pode-se perceber que o caso mais crítico é o da linha 3 do solo de Osasco. A alta porosidade desse solo justifica essa discrepância, pois, durante a moldagem dos corpos de prova em laboratório, a calda de cimento fica sobre a camada de solo. Como se trata de um solo poroso, a água presente nessa calda percolou através da camada de solo, deixando-o mais úmido. Este fato pode ter reduzido os valores de resistência de interface.

Conclusões

A partir dos resultados obtidos dos ensaios laboratoriais realizados podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- A resistência de interface obtida em laboratório é bem próxima dos valores conseguidos nos ensaios de arrancamento executados somente com a bainha por Pacheco e Silva (2009), com exceção para os solos com alta porosidade. Assim, pode ser uma alternativa interessante para estimar a resistência ao cisalhamento de interface (q_s) na fase de pré-dimensionamento da obra.
- Em todos os casos analisados, os parâmetros de resistência (c e ϕ) obtidos a partir do ensaio de cisalhamento da interface solo/calda de cimento reduziram-se com o aumento do tempo de cura. Isso ocorreu pelo fato de a camada de cimento obter maior rigidez com o tempo de cura, interagindo menos com as partículas de solo.

- A resistência ao cisalhamento na interface solo/calda de cimento é menor aos 28 dias, em todos os solos analisados.

Agradecimentos

Ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) pelo suporte técnico a esta pesquisa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida e a todos que contribuíram para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- CLOUTERRE. *Recommandations clouterre projet national clouterre*. Paris: Presses de l'ENPC, 1991. 269 p.
- FRANÇA, F. A. N. *Ensaio de arrancamento em solo grampeado executados em laboratório*. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado) – SGS-USP/SC, São Carlos.
- ORTIGÃO, J. A. R. *Ensaio de Arrancamento para projetos de solo grampeado*, nota técnica, solos e rochas. *ABMS*, v. 20, n. 1, p. 39-43, abr. 1997.
- PACHECO E SILVA, D. *Análise dos fatores executivos de solo grampeado através de ensaios de arrancamento de campo*. 2009. No prelo. Tese (Doutorado) – SGS-USP/SC, São Carlos.
- PITTA, C. A.; SOUZA, G. J. T.; ZIRLIS, A. C. *Solos grampeados: alguns detalhes executivos e casos de obras*. São Paulo: Workshop Solo Grampeado – Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento, 2003. p. 1-20.
- ZIRLIS, A. C.; PITTA, C. A.; SOUZA, G. J. T.; OLIVEIRA, M. *Soil nailing: chumbamento de solos, experiência de uma equipe na aplicação do método*. Rio de Janeiro: COBRAR – Conferência Brasileira de Encostas, 1992. v. 1, p. 81-99.