

Influência do tempo de cura na resistência à tração de fundações reaterradas com mistura de areia-cinza-cal

Cesar Alberto Ruver, Prof. Dr.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil, cesar@ufrgs.br

RESUMO: Este trabalho apresenta os resultados de uma série de ensaios de arrancamento realizados em laboratório (modelo reduzido) em uma fundação com diâmetro (D) de 150 mm, embutida na profundidade de 150 mm ($H/D = 1$), reaterradas com areia fina tratada com mistura (28% em substituição a areia fina) de cinza volante mais cal hidráulica (proporção de 3:1). O objetivo do estudo foi verificar o efeito da variação do tempo de cura (7, 14 e 48 dias) da mistura na resistência à tração, bem como avaliar os mecanismos de fratura para cada tempo de cura. Observou-se que a resistência à tração teve incrementos de 3,7 a 6,3 vezes, para aumentos crescentes de tempos de cura, em relação a areia fina não tratada. Em termos de ruptura, para a areia não tratada ocorre a formação de um troço de cone convexo que emerge na superfície. Para maiores tempos de cura ocorreu a formação de trincas radiais até que em 48 dias de cura, ocorreu o arrancamento de todo o reaterro sem a formação de fissuras ou trincas. Este fato evidencia que existe um tempo de cura ideal, menor que 48 dias de cura, em que não há mais incremento de carga.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Tratado, Resistência à tração, Variação do Tempo de Cura, Ensaio de Arrancamento em Modelos Reduzido.

1 INTRODUÇÃO

As fundações de torres de transmissão de energia elétrica estão sujeitas a carregamentos de tração e de compressão quando submetidos à esforços permanentes e cíclicos. As cargas permanentes são oriundas do peso da própria estrutura (torres e cabos) e esforços de tensão nos cabos, quando ocorre mudança de direção e nas torres de início e fim de linha. Já as cargas cíclicas são oriundas principalmente devido aos ventos, cujo mecanismo é responsável pela ruptura mecânica repentina da linha de transmissão. Como resultado, dependendo das características geométricas das linha de transmissão e das torres, a carga de projeto utilizada no dimensionamento das estruturas é dada pela sobreposição de carga de compressão e de tração, resultante da combinação de cargas verticais e horizontais que venham a atuar ao longo das linhas de transmissão (Pacheco et al., 2008). O presente trabalho está focado nos efeitos de carregamento permanente verticais à tração, como uma etapa importante para otimizar o dimensionamento de fundações superficiais submetidas à tração, constituídas por placas de concreto armado ou aço enterradas a pequenas profundidades.

Os primeiros estudos com fundações tracionadas foram realizados por Balla (1961). Posteriormente, houve diversos estudos, como os realizados na Universidade de Grenoble (BIAREZ e BARRAUD, 1968), Escola Técnica da Nova Escócia (MEYERHOF e ADAMS, 1968), Universidade de Sidney e Universidade do Leste de Ontário (ROWE e DAVIS, 1982a, b), Universidade de Wales (MURRAY e GEDDES, 1987), Universidade do Oeste da Austrália (LEHANE et al., 2008; RATTLEY et al., 2008), entre outros.

Devido ao tipo de carregamento e a intensidade dos esforços, na maioria das vezes são empregados como fundações, estacas ou placas enterradas a grandes profundidades, devido as características dos solos em que as estruturas são construídas. Alguns estudos têm mostrado que fundações superficiais empregadas em camadas de solos tratados com agentes cimentantes, tem aumentado consideravelmente a capacidade de carga, tanto à compressão (STEFANOFF et al., 1983; CONSOLI et al., 2003, 2009), como à tração (CONSOLI et al., 2012, 2013).

Neste sentido, o presente trabalho visa complementar os estudos acima citados, mediante a realização de uma série de ensaios de arrancamento, executados em laboratório, em modelo reduzido,

utilizando uma areia fina tratada com cinza-cal, visando verificar os seguintes aspectos: (a) eficiência do aumento da capacidade de carga à tração para uma fundação superficial variando o tempo de cura; e (b) diferença entre mecanismos de ruptura da areia estabilizada em comparação com a areia natural.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em três partes. Primeiramente, foi feita a caracterização geotécnica dos materiais utilizados. Após foram realizados os ensaios de arrancamento em laboratório (modelo reduzido), cujos resultados serão discutidos posteriormente. E por fim, em paralelo aos ensaios de arrancamento, foram realizados ensaios de compressão simples com as misturas de areias fina estabilizada, para avaliar a evolução da resistência ao longo do tempo.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1 Areia

A areia empregada no estudo é caracterizada como sedimentar eólica, coletada no alto de uma duna, do interior da área do Campus da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, localizada no Bairro Carreiros, na cidade de Rio Grande/RS. É classificada como fina, uniforme e não plástica (SP), conforme Sistema Unificado de Classificação de Solos. Apresenta uma distribuição granulométrica composta por 99,4% de areia fina ($0,075 \text{ mm} < \text{diâmetro} < 0,42 \text{ mm}$) (Figura 1) com $D_{10} = 0,09 \text{ mm}$, $D_{30} = 0,11 \text{ mm}$ e $D_{60} = 0,15 \text{ mm}$; coeficiente de uniformidade (c_u) de 0,96 e coeficiente de curvatura (c_c) de 1,72; índice de vazios máximo e mínimo de 0,81 e 0,56, respectivamente. A peso específico aparente seco dos grãos é de 2,64. Os ensaios de arrancamento foram realizados com uma densidade relativa (D_r) de 55% (massa específica de $1,58 \text{ g/cm}^3$) e 10% de umidade, tanto para a areia natural como para a areia tratada.

A Figura 2 apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, realizados na mesma densidade relativa dos ensaios de arrancamento e compressão simples, na condição saturada, e com tensões normais entre 25kPa e 100kPa. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com amostras de 60 mm de diâmetro com 20 mm de altura, empregando uma velocidade de cisalhamento de 0,3 mm/s e seguindo a norma ASTM D3080 (ASTM, 2011). A partir dos resultados obteve-se um ângulo de atrito efetivo (ϕ')

de $34,6^\circ$, sem intercepto coesivo ($c' = 0,0 \text{ kPa}$), mostrando uma resposta puramente friccional.

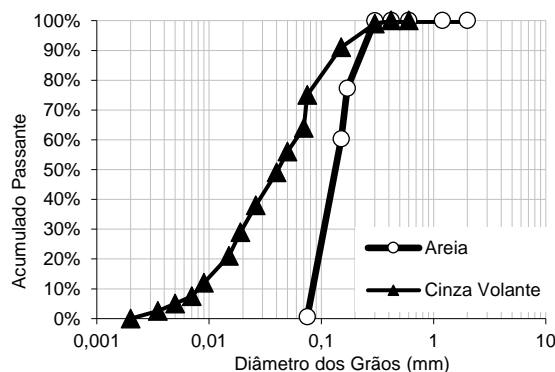


Figura 1. Curvas granulométricas dos materiais empregados.

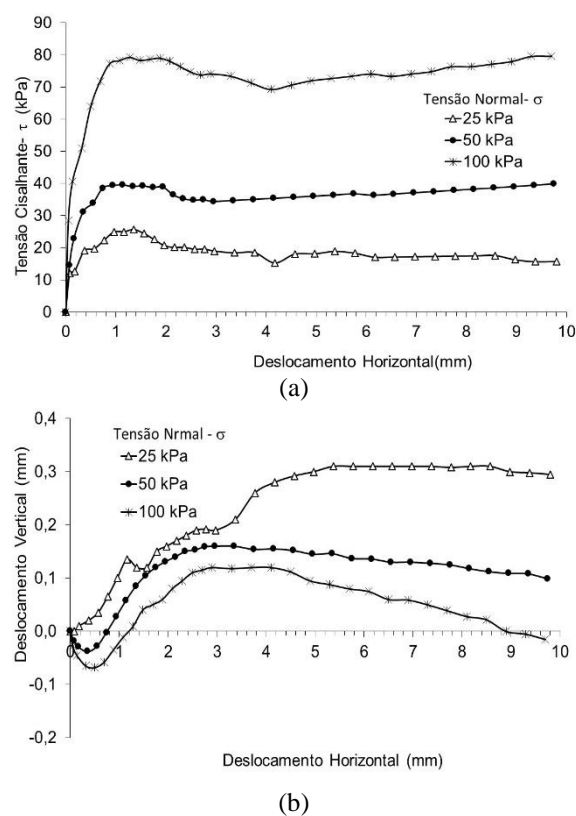


Figura 2. Resultado dos ensaios de cisalhamento direto da areia natural: (a) tensão cisalhante (τ) x deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical e deslocamento horizontal.

3.2 Cinza Volante

A cinza volante empregada é um resíduo da queima do carvão mineral utilizado na termoelétrica localizada na cidade de Candiota/RS. A cinza não apresenta plasticidade, sendo classificada como um silte arenoso (ML) conforme o Sistema Unificado de

Classificação de Solos. Apresenta densidade dos grãos de 2,10. Pela distribuição granulométrica (figura 1), apresenta 25% de areia fina ($0,075 \text{ mm} < \text{diâmetro} < 0,42 \text{ mm}$), 70% de silte ($0,005 \text{ mm} < \text{diâmetro} < 0,075 \text{ mm}$) e 5% de argila ($\text{diâmetro} < 0,005 \text{ mm}$); com $D_{10} = 0,008 \text{ mm}$, $D_{30} = 0,019 \text{ mm}$ e $D_{60} = 0,06 \text{ mm}$; bem como coeficiente de curvatura (c_c) de 0,75 e coeficiente de uniformidade (c_u) de 1,72. Pela composição química possui 69,0% de SiO_2 ; 21,5% de Al_2O_3 ; 6,5% de Fe_2O_3 ; 1,0% de MgO e 0,65% de CaO . O ensaio de difração de raio-X mostra que se trata de um vidro alumino-silicato com 30-35% de quartzo e 15-20% de mulita.

3.3 Cal Hidráulica

Como agente cimentante foi empregado a cal hidráulica. A cal hidráulica utilizada no presente estudo foi adquirida no comércio local (embalagens de 25 kg) e segundo o fabricante é uma mistura de 35% de cinza volante (proveniente da mesma fonte de cinza empregada) e 65% de cal hidratada. A cal hidratada é composta 88% de óxidos totais (dos quais 43,8% de CaO e 25,9% de MgO), com teor de finos de 85,8% (tamanho de grãos menor que $0,075 \text{ mm}$).

3.4 Dosagem de Areia-Cal Hidráulica-Cinza Volante

Para a dosagem da areia fina estabilizada utilizou-se os estudos realizados por Dias (1992). O autor testou diferentes proporções dos três materiais e chegou a um teor ideal a partir da execução de ensaios de compressão simples. Para tanto, utilizou-se uma proporção de 72% de areia fina e 28% da mistura de cinza volante e cal hidráulica e (proporção de 3:1), em massa. Os ensaios de compactação, na energia normal, apresentaram umidade ótima de 10% e massa específica máxima seca de $1,58 \text{ g/cm}^3$.

4 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

4.1 Arrancamento

Para a execução dos ensaios de arrancamento utilizou-se uma placa de aço rígida com diâmetro de 150 mm e espessura de 25,4 mm, transpassada por uma haste rosqueada com 15 mm de diâmetro fixa na placa por meio de parafusos e arruelas. Os ensaios de arrancamento foram realizados com reaterros de areia no estado natural e areia tratada, em um tanque metálico de paredes rígidas com 900 mm de diâmetro e altura de 1200 mm. Para os ensaios com areia natural, a placa era inserida ao longo do processo de

compactação da areia no tanque. Para os ensaios com areia tratada, a areia era compactada até a cota final, após escavava-se uma cava com uma profundidade de 150 mm (D) e diâmetros de 750 mm (5.D), assentava-se a placa no centro e executava-se o reaterro com a mistura mediante o mesmo processo empregado na compactação da areia (ver configuração da Figura 3).

O tanque era preenchido com camadas de areia, compactada manualmente com espessura de 50 mm, até a massa específica seca de $1,58 \text{ g/cm}^3$ e com umidade de 10%. Os ensaios de arrancamento com o reaterro de areia natural foram executados após a compactação e o reaterros com a misturas aguardou-se a cura de 7 dias, 14 dias e 48 dias antes da execução dos ensaios de arrancamento. Durante a compactação das camadas de areia e reaterros, verificava-se, constantemente, a massa específica através do ensaio do cilindro de cravação (sendo utilizado um tubo de PVC com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura), com base na NBR 9813 (ABNT, 2016). A umidade era determinada através do ensaio de frigideira (confirmada posteriormente, pela secagem em estufa), de modo a verificar a eficiência e homogeneidade da compactação.

Para a mistura dos materiais utilizava-se uma betoneira. Antes da mistura, media-se o teor de umidade da areia, através do ensaio da frigideira. Para a areia natural, colocava-se a areia na betoneira acrescentando água potável até a proporção de 10% e iniciava-se a mistura até a total homogeneização. Para a areia tratada, primeiro colocava-se a cal hidráulica e a cinza volante no estado seco, procedendo a mistura; após acrescentava-se a areia úmida, procedendo nova mistura; acrescentando ao final água potável até a proporção de 10%, procedendo nova mistura até a total homogeneização.

Os ensaios de arrancamento foram realizados conforme a norma ASTM D1194 (ASTM, 1994), uma vez que não há normalização brasileira. O carregamento de tração foi aplicado por meio de um macaco hidráulico, que reagia contra um pórtico metálico. A carga era medida através de uma célula de carga “S” e os deslocamentos eram medidos por meio de transdutores de deslocamento (ver Figura 3). Os deslocamentos verticais eram medidos em dois pontos, em posição oposta sobre a haste rosqueada. Além disso, media-se os deslocamentos sobre a superfície do reaterro, com afastamento de 1.D e 3.D do centro. Todos os transdutores de deslocamentos foram afixos em uma régua, que era afixada fora da zona de influência do tanque.

Os ensaios foram realizados por carga incremental, com incrementos não superiores a 10% da carga máxima estimada. Após a aplicação de cada

incremento de carga, eram lidos os deslocamentos automaticamente a cada segundo e manualmente em tempos dobrados (0 segundos, 30 segundos, 1 minutos, 2 minutos e 4 minutos). Embora a estabilização dos deslocamentos tenha ocorrido em tempos inferiores a 1 minuto; somente após transcorridos os 4 minutos, aplicava-se o próximo incremento de carga, até a ruptura total do reaterro.

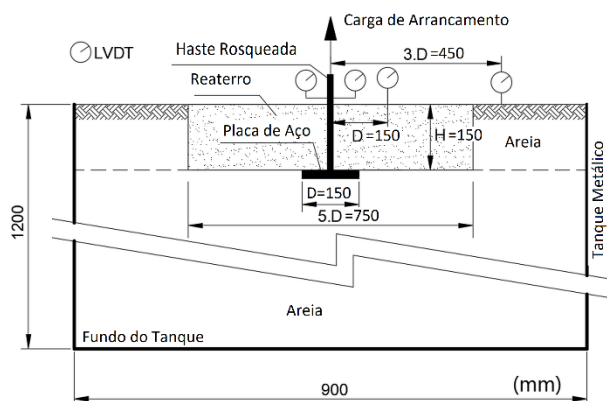


Figura 3. Configuração do ensaio de laboratório.

4.2 Ensaio de Compressão Simples

Como já citado, paralelamente aos ensaios de arrancamento, foram realizados ensaios de compressão simples. Para estes ensaios foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetros de 50 mm e 100 mm de altura. Utilizou-se a mesma dosagem, massa específica e umidade empregada nos ensaios de arrancamento.

Para a moldagem dos corpos de prova, inicialmente pesava-se os materiais secos (areia, cinza volante e a cal hidráulica) e a água destilada, suficiente para a moldagem de três corpos de prova mais uma sobra para determinação da umidade. Após fazia-se a mistura da cal e da cinza até sua homogeneização e acrescentava-se a areia, misturando até sua completa homogeneização. Por fim, acrescentava-se água, misturando até a formação de uma mistura homogênea. Estes procedimentos atendem a norma ASTM D 3551 (ASTM, 2008). Após, procedia-se a moldagem dos corpos de prova com a utilização de um molde metálico tripartido, por meio da compactação estática, dividida em três camadas de igual espessura. Depois da compactação de cada camada, procedia-se a escarificação para uma melhor aderência entre as camadas. Na próxima etapa, procedia-se a desmoldagem, pesagem (precisão de 0,01 g), medição de altura e diâmetros (em três pontos) (precisão de 0,1 mm) e o armazenamento em embalagens plásticas. A cura era realizada em uma câmara úmida com 23° C +/- 2° C e umidade relativa de 95%. Após os tempos de cura

de 7, 14, 28, 48, 90 e 181 dias, efetuou-se a ruptura dos corpos de prova.

Os corpos de prova eram rompidos em uma prensa automática com capacidade total de 50kN, dotada de anéis dinamométricos de 10 e 50 kN, com resolução de 0,005 e 0,023 kN, respectivamente. A velocidade adotada era de 1,14 mm/min. Antes da ruptura, os corpos de prova ficavam imersos em água por 24 horas para minimizar os efeitos de sucção. Decorridas as 24 horas, os corpos de prova eram retirados da água, secos superficialmente com uma flanela e colocados na prensa. Para cada ensaio, procedia-se a leitura da carga máxima suportada. Como os ensaios eram realizados em triplicada, adotou-se um critério de aceitação de +/- 10% em relação à média dos três corpos de provas. O corpo de prova que eventualmente extrapolasse o critério era eliminado e adotava-se a média dos dois corpos de provas remanescentes.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados dos Ensaios de Arrancamento

Os resultados dos ensaios de arrancamento podem ser visualizados na Figura 4, no formato de gráfico de carga x deslocamento para a areia natural e tratada para diferentes tempo de cura. A tabela 1 apresenta um resumo dos resultados com as principais informações obtidas dos ensaios de arrancamento. Para o reaterro natural foram realizados dois ensaios, de modo a demonstrar o efeito da repetibilidade. A Figura 5 mostra a relação entre a carga máximo (Q_{max}) de arrancamento, obtida em cada ensaio, e o respectivo tempo de cura.

Em uma primeira análise, verifica-se que a capacidade de carga à tração com reaterro de areia tratada aumenta com o tempo de cura em relação a areia natural. Isso demonstra a aplicação prática e viável da estabilização de areias com a mistura de cal e cinza, ainda mais ao longo do tempo. Verifica-se um aumento de 3,7 vezes para um tempo de cura de somente 7 dias, passando para uma razão de 5,1 vezes para 14 dias e 6,3 vezes para um tempo de cura de 48 dias. No entanto, o aumento não é proporcional, havendo uma redução da taxa de aumento de capacidade de carga com o aumento do tempo de cura. Um estudo similar foi elaborado por Rattley et al (2008), a partir de ensaios realizados em centrífuga, mostram que a adição de 3% de cimento Portland na areia fina para um tempo de cura de 20 horas (cerca de um dia) (com resistência à compressão simples de 87 kPa), com embutimento de (H/D) de 1,5, levou a um aumento de capacidade de

carga à tração de 3 vezes, em comparação com o reaterro com areia natural. Posteriormente, o estudo de Consoli et al (2013) com ensaios de arrancamento de campo, com a mesma areia fina, tipo de cimento e razão de embutimento, com 7 dias de cura (com resistência à compressão simples de 320 kPa), chegaram a um aumento da capacidade de carga à tração da ordem de 9 vezes. A partir da análise dos dois trabalhos, verifica-se que a resistência à compressão simples obtida por Consoli et al (2013) é 3,7 vezes maior que a resistência obtida por Rattley et al (2008). Já a análise em termos de capacidade de carga, demonstra que a razão entre os estudo de Consoli et al (2013) e Rattley et al (2008) foi de ordem de 3 vezes. Isso demonstrando a influência do tempo de cura no aumento da resistência à compressão simples, e consequentemente na capacidade de carga à tração.

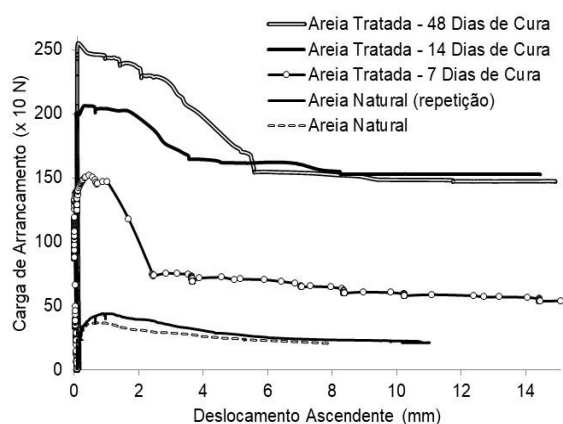


Figura 4. Resultados dos ensaios de arrancamento - curva carga de tração x deslocamento vertical).

Tabela 1 - Resumo dos Ensaios Arrancamento

a	b	c	d	e	f	g	h
1	48	2,501	141,5	56,4	1,442	57,70%	6,3
2	14	2,023	114,45	45,2	1,496	74,00%	5,1
3	7	1,486	84,08	31,2	0,529	35,60%	3,7
7	--	0,364	20,58	8,1	0,204	56,00%	--
8	--	0,432	24,46	9,5	0,209	48,30%	--

Onde a: ensaio, b: tempo de cura (dias), c: carga máxima de tração (kN), d: tensão máxima de tração (kPa), e: fator de carga (razão entre a tensão máxima e a tensão efetiva na base da placa), f: carga de tração residual/última (kN), g: razão entre carga máxima e residual, e h: razão entre a carga máxima da areia tratada e máxima média da natural

A tabela 1 apresenta a carga residual (para um deslocamento próximo a 10% do diâmetro da placa) e a razão com o valor da carga máxima. A carga residual, pode ser interpretada como sendo ao peso

de solo confinada entre a superfície de ruptura e placa, mais o peso da placa e da haste rosqueada, uma vez que com este deslocamento da placa, toda a resistência ao cisalhamento foi mobilizada. A razão média entre a carga máxima e a residual de arrancamento para o reaterro com areia natural foi de ordem de 52% (parcela referente ao peso), demonstrando que 48% da capacidade de carga foi devido a resistência ao cisalhamento. Para a areia cimentada, com 7 dias de cura, a razão entre a carga máxima e a residual foi de 36%, demonstrando que a resistência ao cisalhamento corresponde a uma parcela de 2/3 do total da capacidade de carga. A razão entre as carga para os tempos de cura de 14 e 48 dias, foi de 74% e 57,7%, respectivamente. Verifica-se diferentes relações de distribuição de percentual de peso e resistência ao cisalhamento na capacidade de carga para a areia tratada, para os diferentes tempos de cura, fato que pode ser atribuído aos diferentes mecanismos e formas de ruptura que ocorreram nos ensaios de carregamento. Neste sentido, analisando a intensidade das cargas residuais, verifica-se que quanto maior o valor, maior é o peso de solo contido entre a superfície de ruptura, e consequentemente, mais expandida é a superfície de ruptura formada.

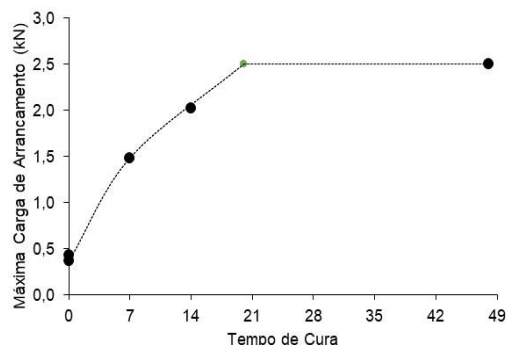


Figura 5. Resultados dos Ensaios de Arrancamento - carga máxima de tração (Q_{max}) x tempo de cura.

5.1.1 Mecanismo de Ruptura

O mecanismo de ruptura dos ensaios de arrancamento foi investigado a partir da observação dos deslocamentos e deformações (tabela 2), superfície de ruptura e propagação das trincas formadas na superfície do reaterro, bem como pela exumação do reaterro após a conclusão dos ensaios de arrancamento (cortes verticais passando pelo centro do reaterro, dividindo-o ao meio). A análise dos mecanismos de ruptura auxilia o entendimento da resposta carga-deslocamento, anteriormente discutida.

Para o reaterro com areia natural, verificou-se a formação de um tronco cone convexo, cuja superfície inicia da placa e se estende a superfície do reaterro com um diâmetro da ordem de 400 mm (~2,7.D). Inicialmente ocorre a formação de um círculo de fissuras mais externo (com 400 mm de diâmetro), passando para o colapso das extremidades desta superfície, seguido da formação de um círculo de fissuras mais interno. A figura 6(a) mostra o aspecto da superfície de ruptura após o final do ensaio de arrancamento. Analisando a tabela 2, verifica-se que os transdutores de deslocamento não apresentaram registro em uma distância de 3.D do centro, sendo registrados deslocamentos na superfície a uma distância de 1.D. Ainda pela tabela 2, verifica-se que a deformação na máxima carga de arrancamento foi da ordem de 0,5%.

Tabela 2 - Deslocamento e Deformações Registrado nos Ensaio

Ensaio	Tempo de Cura	Máxima Carga			Carga Residual		
		ρ_{0D}	ρ_{1D}	ρ_{3D}	ρ_{0D}	ρ_{1D}	ρ_{3D}
1	48	0,03	0,09	0,14	15,00	18,34	21,75
2	14	0,29	0,42	0,36	15,00	16,79	20,42
3	7	0,37	0,61	0,11	15,00	17,00	3,83
7	--	0,66	0,38	0,00	15,00	10,95	0,00
8	--	0,91	0,21	0,00	15,00	8,39	0,00

Onde: ρ_{0D} = Deslocamento da placa medida na haste rosqueada (mm); ρ_{1D} = Deslocamento na superfície do reaterro a distância de 1.D do centro (mm); ρ_{3D} = Deslocamento na superfície do reaterro a distância de 3.D do centro (mm)

Para o reaterro com areia tratada com 7 dias de cura, também se verificou a formação de um tronco de cone, com formação de fissuras radiais e circulares, como mostrado na figura 6(b). Pelas fissuras e exumação, percebe-se que a superfície de ruptura se estende desde a placa até a superfície do reaterro, atingindo quase a borda do reaterro (~ 5.D). Este fato é evidenciado pela tabela 2, onde se verifica-se deslocamentos no transdutor instalado na superfície a uma distância de 3.D do centro da placa. Neste caso, como a superfície de ruptura é maior que a superfície de ruptura do reaterro com areia natural (embora tenha formato e configuração parecida) a carga residual também é maior, ou seja, apresenta maior peso. Ainda pela tabela 2, é possível verificar que o comportamento é mais rígido (cerca do dobro, com deformação na carga máxima de 0,25%) comparado ao reaterro com areia natural. A figura 6(c) mostra a superfície de ruptura do reaterro com areia tratada para 14 dias de cura. Neste tempo de cura é possível verificar que ocorreu a formação de

fissuras radiais que se estendem do centro as bordas externas do reaterro, formando grandes blocos ao final do ensaio de arrancamento. Já a figura 6(d) mostra a superfície de ruptura para um tempo de cura de 48 dias. Para este tempo de cura, não houve a ruptura do reaterro tratado, sendo o mesmo extraído de forma íntegra. Como a placa e o reaterro formaram um conjunto consolidado, verifica-se ocorre uma superfície de ruptura na areia natural que se estende até quase atingir as bordas do tanque. É importante destacar que em nenhum dos ensaios houve a influência das paredes do tanque laterais, pois nenhuma fissura ou superfície de ruptura avançou até as bordas, e também pelo fato das paredes serem lisas, minimizando o atrito da areia com o metal. Neste sentido, mesmo que se tivesse utilizado um tanque com maiores dimensões os resultados seriam semelhantes. Pela tabela 2 é possível verificar que tanto para 14 dias com para 48 dias, ocorreu um deslocamento da mesma ordem em todos os transdutores de deslocamento (centro, a 1.D e 3.D) - embora os valores não sejam uniformes. Ainda pela tabela 1, é possível verificar que os valores das cargas residuais para ambos os tempos de cura de 14 e 48 dias, apresentam praticamente o mesmo valor. Em termos de rigidez, verifica-se que quanto maior o tempo de cura, maior a rigidez (coluna 3 da tabela 2).

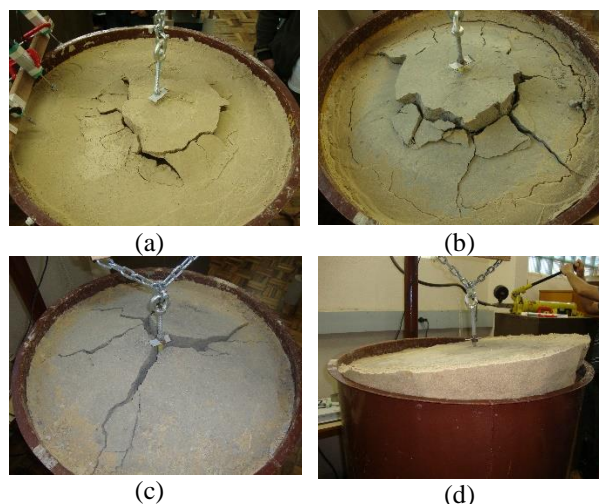


Figura 6. Superfície de Ruptura ao Final dos Ensaio de Arrancamento: (a) reaterro com areia natural; reaterro com areia estabilizada para (b) 7 dias, (c) 14 dias e (d) 48 dias

As análises mostram que há um tempo de cura ideal (entre 14 e 48 dias) em que a resistência à tração da areia é igual ou superior as tensões de tração internas geradas pelo processo de arrancamento, sendo o reaterro consolidado a placa de fundação, formando um elemento único. Quando isso acontece, a ruptura ocorre na areia natural que circula o reaterro de areia estabilizada. Isso também demonstra que

quando se atinge o tempo de cura ideal (hipoteticamente demonstrado pelo ponto de inflexão da figura 5), a capacidade de carga é a carga máxima que pode ser obtida no ensaios de arrancamento, considerando a geometria, o solo natural e solo estabilizado que se está estudando. Fato semelhante foi observado na tese de Ruver (2011), quando o autor observou que na realização de ensaio de arrancamento em campo com reaterros de areia tratada, que com teores de 3% de cimento Portland ocorria a ruptura no reaterro e com 7% de cimento Portland ocorria o arrancamento integro do reaterro, sem danos ou fissuras no mesmo. Com isso, o autor concluiu que para a configuração estudada (mesma geometria e materiais), havia um teor ótimo de cimento Portland, e que a utilização de maiores teores não acarretaria aumento de capacidade de carga à tração.

5.2 Resistência à Compressão Simples

A figura 7 apresenta os resultados das médias da resistência à compressão simples para os diferentes tempos de cura (7, 14, 28, 48, 90 e 181 dias). Pela figura 7 é possível observar que com o aumento do tempo de cura ocorre o aumento da resistência à compressão simples. Pela análise estatística, por regressão, verifica-se que o aumento de resistência segue uma tendência linear (melhor ajuste com $R^2 = 0,9872$) até pelos menos os 181 dias de cura. O aumento da resistência é característico de mistura de estabilização com cal, uma vez que as reações químicas responsáveis pela resistência são lentas. Em comparação com a Figura 5, verifica-se, como já demonstrado, que a capacidade de carga nos ensaios de arrancamento não segue esta tendência.

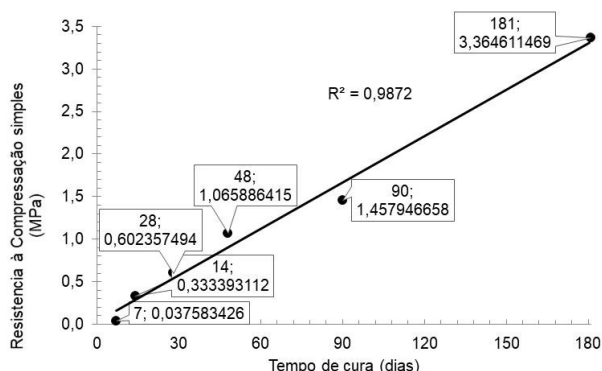


Figura 7. Resultado dos Ensaios de Resistência à Compressão Simples

6 CONCLUSÕES

As conclusões do presente trabalho podem ser assim resumidas:

- A estabilização de uma areia fina pode ser tratada/estabilizada, com uso prático na engenharia, com cal hidráulica e cinza volante, mostrando um aumento de resistência tanto em ensaios de compressão simples, como ensaios de arrancamento;
- A capacidade de carga à tração de fundações reaterradas com areia tratada aumenta com o tempo de cura: 3,7 vezes para 7 dias de cura; 5,1 vezes para 14 dias de cura; e 6,3 vezes para 48 dias de cura;
- A superfície de ruptura dos ensaios de arrancamento para o reaterro com areia natural, apresentou o formato de tronco de cone convexo, formando um círculo com diâmetros de cerca de 2,7.D na superfície do reaterro;
- As superfícies de ruptura para os reaterro com a areia tratada, apresentaram diferentes configurações, que foram influenciadas pelo ganho de resistência da mistura ao longo do tempo de cura, sendo que para 7 dias houve a formação de um tronco de cone imergindo na superfície do reaterro a cerca de 5.D; passando pela fissuração radial e quebra do reaterro em blocos para 14 dias de cura; até o completo arrancamento do reaterro sem dados para 48 dias;
- Verificou-se que diferentemente dos ensaios de compressão simples, onde ocorre um aumento linear de resistência até pelo menos 181 dias de cura, que nos ensaios de arrancamento existem um tempo de cura ótimo, sendo que após este tempo de cura (entre 14 e 48 dias), não há mais incremento de capacidade de carga máxima, sendo a ruptura causada pelo solo natural.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 9813: Solo — Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação*. 5 p.
- American Society for Testing and Materials (1994). *D 1194: Standard test method for bearing capacity of soil for static load and spread footings*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials (2011). *D 3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials (2008) *D 3551: Standard Practice for Laboratory Preparation of Soil-Lime Mixtures Using Mechanical Mixer*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

- Balla, A. (1961). The resistance to breaking out mushroom foundations for pylons. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, France, 1, pp 569-576.
- Biarez, J.; Barraud, Y. (1968). Adaptation des foundations de pylons au terrain par les methods de la mécanique des sols. Rapport 22-06 de la CIGRÉ, Paris.
- Consoli, N.C.; Vendruscolo, M.A.; Prietto, P.D.M. (2003). *Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129(1): 96-101.
- Consoli, N.C.; Dalla Rosa, F.; Fonini, A. (2009). Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 135(12): 1846-1856.
- Consoli, N.C.; Thomé, A.; Girardello, V.; Ruver, C. A. (2012) Uplift behavior of plates embedded in fiber-reinforced cement stabilized backfill. *Geotextiles and Geomembranes*, 36: 107-111.
- Consoli, N.C.; Ruver, C.A.; Schnaid, F. (2013) Uplift Performance of Anchor Plates Embedded in Cement-Stabilized Backfill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 139(3): 511-517.
- Dias, C. R. R. (1992) *Caracterização dos parâmetros de sedimentação e adensamento de solo sedimentar da Planície Costeira- Região de Rio Grande*. Relatório Técnico, Projeto de Pesquisa FAPERGS.
- Lehane, B.M.; Gaudin, C.; Richards, D.J.; Rattley, M.J. (2008) Rate effects on the vertical uplift capacity of footings founded in clay. *Géotechnique*, 58(1): 13–21.
- Meyerhof, G.G.; Adams, J.I. (1968) The ultimate uplift capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 5(4): 225–244.
- Murray, E.J.; Geddes, J.D. (1987) Uplift of anchor plates in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 113(3): 202–215.
- Pacheco MP, Danziger FAB and Pinto CP (2008) Design of shallow foundations under tensile loading for transmission line towers: An overview. *Engineering Geology*, 101: 226-235.
- Rattley, M.; Lehane, B.M.; Consoli, N.C.; Richards, D.J. (2008) Uplift of shallow foundations with cement-stabilised backfill. *Ground Improvement*, 161(2): 103-110.
- Rowe, R.K.; Davis, E.H. (1982a) The behavior of anchor plates in clay. *Géotechnique* 32(1): 9-23.
- Rowe, R.K.; Davis, E.H. (1982b): The behavior of anchor plates in sand. *Géotechnique* 32(1): 25-41.
- Ruver, C. A. (2011). *Estudo do Arrancamento de Fundações em Solos Tratados com Cimento*. Tese Doutorado. PPGEC/UFRGS, Porto Alegre/RS, 333p.
- Stefanoff G, Jelle J, Tsankova N, Karachorov P and Slavov P (1983). Stress and strain state of a cement-loess cushion. In: *Proceedings of the 8th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp 811-816.