

Avaliação do Efeito da Granulometria na Resistência ao Cisalhamento de um Estéril de Minério de Ferro

Christ Jesus Barriga Paria

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, cjbarriga_87@hotmail.com

Eleonardo Lucas Pereira

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, eleonardopereira@gmail.com

Hernani Mota de Lima

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, hernani.lima@ufop.br

RESUMO: Geralmente, na fase de projeto de uma pilhas de estéril os parâmetros de resistência obtidos em laboratório correspondem a faixas granulométricas diferentes daquelas do estéril disposto nas pilhas. Portanto, faz-se necessário determinar o efeito de escala granulométrica nos parâmetros de resistência. O objetivo principal desta dissertação é estudar o comportamento do estéril em função do efeito de escala granulométrica e aferir as variações nas suas propriedades geotécnicas. Foram realizados ensaios para avaliar a influência do tamanho dos grãos nos parâmetros de resistência do estéril. Na execução do programa experimental foram utilizadas amostras obtidas a partir de ensaios de caracterização física adequados às normas vigentes. A metodologia adotada baseou-se no comportamento de um estéril submetido ao cisalhamento direto e sua relação com os parâmetros de resistência obtidos para várias faixas granulométricas. Analisou-se a influência do tamanho dos grãos nas propriedades geotécnicas do estéril, enfatizando sua influência nos parâmetros de resistência de um estéril de minério de ferro. Ensaios de cisalhamento direto realizados em amostras estruturadas artificialmente foram adotados. Com base nesta investigação foram obtidas correlações da granulometria com uma compacidade relativa conhecida empiricamente, que ressaltam a influência destes parâmetros no valor do ângulo de atrito deste estéril. Dois equipamentos de cisalhamento direto automatizados, um de grande porte e um convencional, foram usados ao longo da pesquisa. A execução de ensaios de cisalhamento, em especial de grande porte, para a determinação dos parâmetros de resistência dos estéreis mostrou-se uma ferramenta consistente, quando aplicada a estéreis granulares. A concordância e a reprodutibilidade dos resultados para as diferentes amostras, com granulometrias variadas, atestam e aferem a qualidade das moldagens propostas e realizadas. Percebeu-se os ângulos de atrito guardam uma menor amplitude de diferença entre os ângulos equivalentes a cada redução da granulometria do material estéril estudado. No entanto, é evidente que uma reavaliação do diâmetro máximo dos grãos a ser utilizado para uma determinada altura do CP é necessário. A dependência entre a granulometria das amostras de estéril e a resistência ao cisalhamento do estéril foi percebida pela tendência do decréscimo do ângulo de atrito com a redução do diâmetro das suas partículas. Ressalta-se que para pilhas dimensionadas a partir de ensaios realizados com granulometrias reduzidas quando comparadas àquelas presentes em campo o projeto caminha no sentido da segurança, pois se projetam estruturas baseadas em parâmetros conservadores. No entanto, a avaliação do efeito de escala pode contribuir para minimização das áreas de disposição e, consequentemente, em impactos ambientais significativamente menores.

PALAVRAS-CHAVE: resistência, estéril, granulometria, cisalhamento, ensaio de cisalhamento direto.

1 INTRODUÇÃO

Materiais estéreis podem ser avaliados a partir da análise do comportamento de solos arenosos. Esta aproximação se apóia nas correspondências que acontecem nas propriedades destes materiais. A menor concentração de finos plásticos e o efeito da compactação, em ambos os materiais, tem justificado a adoção de técnicas de avaliação, metodologias de ensaios similares às usadas para solos propriamente arenosos. Porém, deve ser destacado que além do estéril ter uma similitude com a granulometria da areia, o seu comportamento não pode ser estimado exatamente ao mesmo de uma areia, devido principalmente às características mineralógicas que o diferencia e à presença predominante de partículas de ferro (no caso do rejeito de minério de ferro objeto desse estudo), fundamentando assim uma análise mais cuidadosa.

Normalmente os solos granulares consistem de arranjos com formas irregulares aleatoriamente formados por partículas de granulometria variada. Assim, os mais importantes fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento de uma massa de solo granular são o tipo de partícula que forma este solo, o arranjo das partículas e índice de densidade (I_D), conhecido como compactação relativa (CR). O comportamento dos solos granulares quando dependente de forças externas é regido pelas forças individuais e deslocamentos que ocorrem em cada ponto de contato. Sendo as tensões transmitidas nos pontos de contato muito grandes, pode-se afirmar que a resistência ao cisalhamento desses solos é devida, basicamente, ao componente horizontal da força entre suas partículas. Para mobilizar a resistência ao cisalhamento devem ocorrer deformações no solo, sendo o movimento referente entre os grãos o principal agente desta ação.

Pilhas de estéril, frequentemente, são estruturas de grande porte, formadas por grandes quantidades de estéril denominado franco ou de minério marginal. No caso de minas a céu aberto, aos procedimentos para se atingir o minério com substancial valor econômico, podem gerar grandes quantidades

de estéril, que, quando dispostos sem controle podem ser fontes prováveis de deslizamentos em escala assustadora como a ocorrida em 1966 na cidade de Aberfan, País de Gales, Grã-Bretanha.

Para se evitar acidentes dessa magnitude e garantir a estabilidade química e física de pilhas de estéril, muitos estudos e ensaios são conduzidos para obtenção das propriedades dos materiais. Neste contexto, o estudo do comportamento do estéril em função da sua granulometria associada aos parâmetros de resistência mostra-se interessante, principalmente, através de análises que quantifiquem a influência dos tamanhos das partículas no ângulo de atrito do material estéril.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Local de Estudo

O estudo consistiu de ensaios de caracterização e cisalhamento direto realizados no Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada (CTGA) do Núcleo de Geotecnia (NUGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

O programa experimental da presente pesquisa foi desenvolvido a partir da utilização de uma amostra oriunda de uma mina de ferro situado no Quadrilátero Ferrífero, tendo sido coletada de forma aleatória de um ponto representativo da pilha de estéril. Para a determinação das características físicas e químicas do estéril adotou-se, metodicamente, os procedimentos normativos de acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e, quando da ausência destes, procedimentos internacionais, como por exemplo, o da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM).

2.2 Programa Experimental

Foram cuidadosamente realizados ensaios de caracterização do estéril para a determinação da granulometria, massa específica dos grãos, índices de vazios máximo e mínimo e ensaios de cisalhamento direto. Este último objetivou a obtenção dos parâmetros de resistência. O ensaio de cisalhamento direto foi escolhido

pelas características do material em estudo. A facilidade de acesso e de manipulação do cisalhamento direto contribuíram para a escolha do ensaio.

2.2.1 Cominuição da amostra de estéril, identificação e construção das curvas granulométricas

A avaliação da granulometria do estéril tem fundamental importância no projeto de pilhas de estéril, em razão de condicionar várias propriedades geotécnicas dos materiais granulares, como arranjo dos grãos, permeabilidade e resistência ao cisalhamento, esta última, objeto de estudo do presente trabalho. Assim, torna-se necessária à obtenção da distribuição granulométrica inicial da amostra de estéril obtida para posterior construção das curvas preparadas para uma análise da influência da granulometria nos parâmetros de resistência do estéril usado no estudo.

Foi estabelecida uma classificação granulométrica da amostra obtida em campo baseada na Norma Brasileira NBR 7181 (ABNT, 1984). Primeiramente realizou-se o peneiramento para a determinação das frações mais grossas da amostra como tamanhos de grãos similares ao pedregulho e as areias, com o uso das tradicionais peneiras disponíveis no laboratório, sendo a abertura máxima de 75 mm e a abertura mínima de 38 μ m. Para obtenção das porcentagens dos materiais finos, representados por siltes e argilas, não se realizou o convencional procedimento de sedimentação. Optou-se pela granulometria por difração a laser, que mede as distribuições de tamanho dos grãos por medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra. Partículas grandes dispersam a luz em pequenos ângulos em relação ao feixe de laser e partículas pequenas dispersam a luz em ângulos grandes. A curva granulométrica do estéril é mostrada na Figura 1.

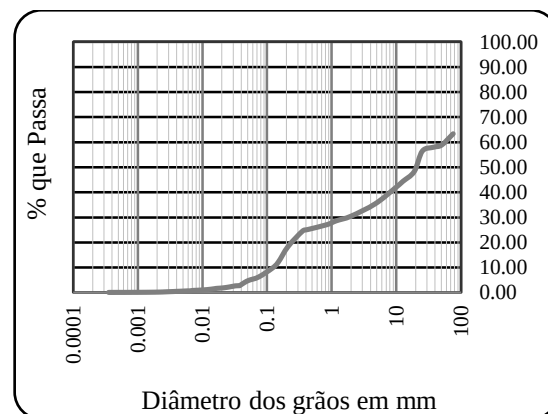


Figura 1. Curva granulométrica do estéril obtido em campo.

Como o objetivo da presente pesquisa incorpora especialmente uma avaliação do efeito de escala, o estéril foi então levado ao britador para redução da granulometria, de forma a possibilitar a realização dos ensaios de resistência em amostras de granulometria menor.

O britador de mandíbulas com uma abertura aproximada de 18 mm foi usado para britagem primária.

Após passar pela britagem primária, parte do material foi então britado novamente, através de um britador de rolos, ajustado para uma abertura aproximada de 7 mm.

Como etapa final do processo, uma parte do material cominuído no britador de rolos foi levada à moagem por meio de um moinho com carga de bolas para obtenção de fração granulométrica fina.

A reprodução das curvas granulométricas teve como princípio a manutenção da proporção de graduação do estéril, para materiais de granulometria menor, adaptando-os para ensaios nas caixas de cisalhamento de grande porte e convencional. No caso do equipamento de grande porte (descrito neste capítulo), a sua caixa de cisalhamento possui dimensões de 200 mm x 200 mm e altura de amostra de 50 mm. Objetivando obter um comportamento em que a ruptura em si é caracterizada pela formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa de material, evitando o cisalhamento do grão do estéril, somente o material passante na peneira 3/4" foi utilizado. Desta forma, o maior diâmetro equivalente da partícula levado à caixa de cisalhamento foi de 19 mm.

Portanto, utilizou-se o material original como referência para obtenção das demais curvas, considerando somente parte da curva, correspondente à representação dos grãos menores que 19 mm. As demais curvas foram construídas considerando a mesma feição da curva original, obtidas graficamente por meio de paralelismo. Elas foram distribuídas longitudinalmente com iguais espaçamentos, para depois, mediante o método analítico, obter as porcentagens passantes e pesos retidos para cada um das diferentes faixas de tamanhos de grãos. A Figura 2, apresenta quatro curvas, sendo que a última, denominada EMF-03, com granulometria premeditada do material de forma que 50% ficasse retido na peneira #200 (abertura de 75 μ m). Desta forma, todas as amostras viriam a se comportar como maiormente granulares.

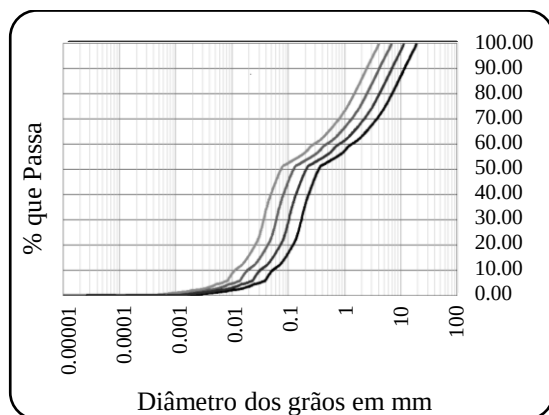


Figura 2. Curvas granulométricas das amostras de estéril estruturadas artificialmente.

As amostras foram estruturas artificialmente e foram identificadas por 3 letras seguidas de dois números. As três letras referem-se ao Estéril de Minério de Ferro, e os algoritmos subsequentes correspondem à variação da granulometria do estéril. Realizou-se um procedimento oposto da análise granulométrica, pois de maneira gráfica, criticamente, conseguiu-se obter os valores das porcentagens acumuladas, para depois conseguir analiticamente os valores das porcentagens retidas acumuladas e parciais, atingindo-se, ao final, os pesos necessários das parcelas. Os percentuais obtidos, representados pelas curvas já apresentadas, são mostrados na Tabela 1 (ABNT).

A Tabela 2 apresenta, a partir das análises granulométricas realizadas nas amostras, os

valores dos diâmetros característicos D_{10} , D_{30} , D_{50} e D_{90} e o valor do coeficiente de não-uniformidade (CNU) e de curvatura (CC). Estes valores foram obtidos com a finalidade de verificar como a granulometria das amostras, com base nos diâmetros característicos, interfere no ângulo de atrito.

Tabela 1: Distribuição granulométrica conforme a ABNT

Escala		EMF-00	EMF-01	EMF-02	EMF-03
		(%)	(%)	(%)	(%)
Pedregulho	G	-	-	-	-
	M	22,78	12,94	2,85	-
	F	14,08	18,21	21,06	14,17
Areia	G	9,03	11,18	14,39	18,92
	M	18,46	8,39	8,06	10,04
	F	24,49	32,01	24,11	11,21
Silte		10,79	16,47	28,13	43,52
Argila		0,36	0,81	1,39	2,14

Tabela 2: Resumo das Características Granulométricas das Amostras

AMOSTRA	D_{60} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	CNU	CC
EMF-00	1,40	0,170	0,055	25,5	0,4
EMF-01	0,79	0,100	0,030	26,3	0,4
EMF-02	0,47	0,061	0,020	23,5	0,4
EMF-03	0,28	0,036	0,012	23,3	0,4

Observa-se que os coeficientes de não-uniformidade (CNU), para todas as amostras, é superior a 15, caracterizando materiais com curvas granulométricas bem abatidas, ocupando uma região mais ampla, com diâmetros diferentes, comportamento típico materiais não-uniformes.

Apesar de classificações clássicas atribuírem solos granulares como possuidores de coeficientes de curvatura (CC) entre 1 e 3, os estéreis estudados apresentam uma graduação razoável. Apesar do valor de D_{30} se aproximar relativamente de D_{10} , observa-se uma crescente quando se avalia o D_{50} . Afinal, buscou-se trabalhar com uma granulometria bem distribuída, que apresentasse uma distribuição proporcionalmente equivalente à amostra original, como já destacado no capítulo do programa experimental.

2.2.2 Massa específica dos grãos e Índices de Vazios

Os ensaios foram realizados em conformidade com as normas brasileiras: NBR 6508 (ABNT, 1984) “Determinação da massa específica grãos de solo que passam na peneira de 4.8 mm” e NBR 6458 (ABNT, 1984) “Determinação da massa específica grãos de pedregulho retidos na peneira de 4.8 mm”.

Os procedimentos das normas NBR 12004 (ABNT, 1990), “Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos” e NBR 12051 (ABNT, 1991), “Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos”, destacam a obtenção das massas específicas máxima e mínima de materiais granulares, conhecendo-se a massa específica dos grãos do material, para obtenção dos índices de vazios mínimo e máximo, respectivamente.

Teoricamente, calculou-se o valor do índice de vazios para uma compactação relativa (CR) de 50%. Cada amostra apresentou um índice de vazios diferente, visto que os seus índices de vazios máximo e mínimo também são diferentes. Portanto, não é possível estabelecer uma correlação em função do índice de vazios, mas sim da compactação relativa.

O resumo dos valores obtidos para estas amostras podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3: Massas específicas secas de cada amostra para CR = 50%

Amostra	e_{max}	e_{min}	e	ρ_s g/cm ³	ρ_d g/cm ³
EMF-0	0,83	0,24	0,53	3,938	2,568
EMF-1	0,9	0,25	0,57	3,96	2,516
EMF-2	0,86	0,24	0,55	3,952	2,549
EMF-3	1,00	0,32	0,66	4,096	2,467

A obtenção destes valores foi fundamental para moldagem da amostra, já destacada no capítulo anterior, pois, a partir do conhecimento do valor da massa específica seca e do volume do molde, calculou-se o valor da massa utilizada em cada molde, para as diferentes amostras.

2.2.3 Ensaio de resistência ao cisalhamento

Para a avaliação do comportamento das amostras estruturadas artificialmente, foram realizados ensaios de cisalhamento direto convencional (Figura 3) e no grande porte (Figura 4), em equipamentos compacto servo-controlado. Os procedimentos experimentais envolveram séries de amostras ensaiadas sob diferentes tensões confinantes seguindo as normas D3080/D3080M-11 da ASTM.

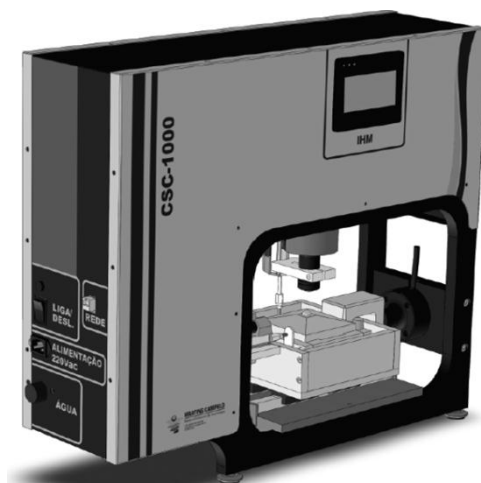


Figura 3. Vista do equipamento de cisalhamento direto convencional compacto.



Figura 4. Vista do equipamento de cisalhamento direto de grande porte automatizado.

Seguidamente mostra-se os gráficos obtidos nos testes de cisalhamento realizados para cada amostra, correspondendo ao ensaios feitos no Equipamento de Grande Porte as Figuras 5 à 8.

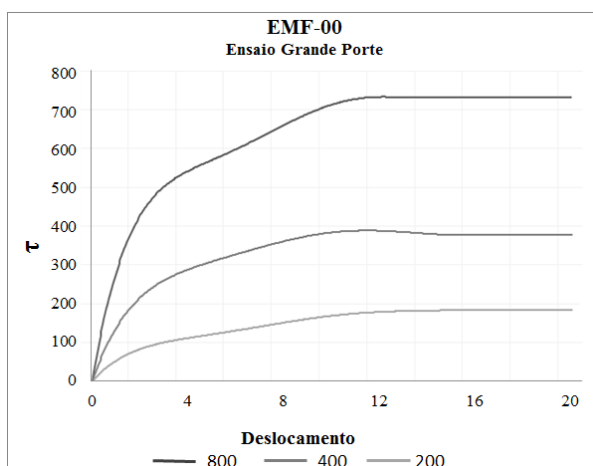


Figura 5. Relação entre Tensão Cisalhante e Deslocamento da amostra EMF-00. Ensaio de Grande Porte.

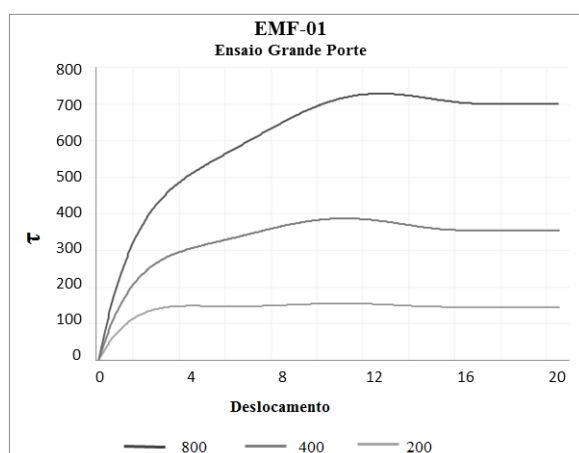


Figura 6. Relação entre Tensão Cisalhante e Deslocamento da amostra EMF-01. Ensaio de Grande Porte.

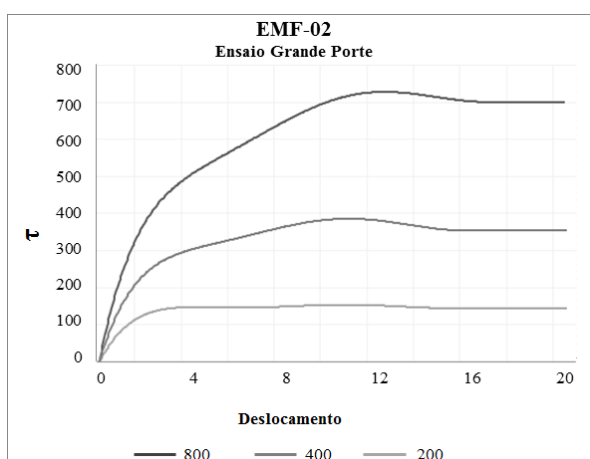


Figura 7. Relação entre Tensão Cisalhante e Deslocamento da amostra EMF-02. Ensaio de Grande Porte.

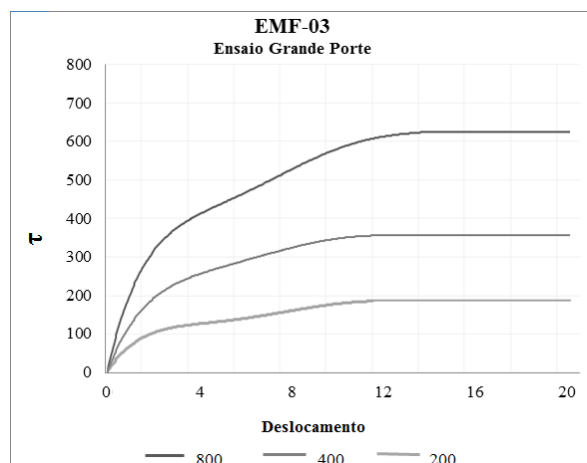


Figura 8. Relação entre Tensão Cisalhante e Deslocamento da amostra EMF-03. Ensaio de Grande Porte.

Os ângulos de atrito obtidos são destacados na Tabela 4.

Tabela 4: Valores de ângulo de atrito efetivo (ϕ')

AMOSTRA	Ângulo de Atrito (ϕ') ($^{\circ}$)	
	Equipamento Grande Porte	Equipamento Convencional
EMF-00	42,83	-
EMF-01	42,38	41,93
EMF-02	41,95	41,53
EMF-03	40,36	41,37

3 ANALISE DOS RESULTADOS

O aumento da resistência da amostra EMF-00 no ensaio de grande porte também pode ser atribuída ao maior teor de ferro presente. Desta forma, tanto a granulometria como o elevado teor de ferro (demonstrado no alto valor da massa específica dos grãos) contribuíram para o aumento do valor do ângulo de atrito da amostra original.

Há de se destacar ainda que as amostras EMF-01, EMF-02 e EMF-03 foram obtidas e construídas considerando-se a mesma feição da curva original, obtidas graficamente por meio de paralelismo. Para tanto, conforme já destacado neste trabalho, a amostra original foi cominuída por britadores. A operação de britagem produz abrasão entre os grãos do material, que pode influenciar na forma e na rugosidade dos grãos. O processo pode gerar

grãos menos rugosos e angulosos, contribuindo para a redução do atrito superficial, o que gera, em consequência, uma redução do ângulo de atrito. Materiais constituídos por grãos angulares tendem a ter entrosamento maior do que solos compostos de partículas arredondadas. Assim, grãos angulares tendem a ter ângulos de atrito maiores.

A linearidade expressa no ensaio com o equipamento convencional pode estar relacionada ao comportamento único experimentado durante o cisalhamento para todas as amostras. Ressalta-se que, mesmo com a exclusão da amostra EMF-00, a amostra mais fina (EMF-03) apresenta grãos com diâmetro máximo de 4 mm, correspondente a um quinto da altura do CP. O desempenho dilatante foi observado para todas as amostras ensaiadas. Já no ensaio de grande porte, considerando que o valor do CP deve ser, no mínimo, 6 vezes o diâmetro do maior grão do material a ser ensaiado, a amostra EMF-03 está perfeitamente alinhada aos procedimentos da norma norte americana. Observa-se que apenas para esta amostra, quando comparados os dois equipamentos, o ângulo de atrito obtido foi maior para o ensaio convencional ($41,37^\circ$) do que para o de grande porte ($40,36^\circ$).

4 CONCLUSÕES

Dois equipamentos de cisalhamento direto automatizados, um de grande porte e um convencional, foram usados ao longo da pesquisa. Mostraram-se ferramentas consistentes, com sistema de aquisição de dados e inserção de dados consistentes, e o *software* utilizado foi julgado bastante amigável. Tratam-se de ferramentas que contribuem para a precisão na obtenção de dados e redução de possíveis fontes de erros de leitura. Os avanços tecnológicos implementados no equipamento de grande porte, visando melhorar a operacionalização, foram significativos, de acordo com as especificações da American Society for Testing and Materials.

A execução de ensaios de cisalhamento, em especial de grande porte, para a determinação dos parâmetros de resistência dos estéreis mostrou-se uma ferramenta consistente, quando

aplicada a estéreis granulares. A concordância e a reprodutibilidade dos resultados para as diferentes amostras, com granulometrias variadas, atestaram e aferiram a qualidade das moldagens propostas e realizadas.

Os resultados dos ensaios realizados no equipamento convencional mostraram-se mais conservadores quando comparados aos resultados do equipamento de grande porte. Percebeu-se os ângulos de atrito guardam uma menor amplitude de diferença entre os ângulos equivalentes a cada redução da granulometria do material estéril estudado.

No entanto, é evidente que uma reavaliação do diâmetro máximo dos grãos a ser utilizado para uma determinada altura do CP. O efeito do tamanho do grão durante o cisalhamento foi observado, em especial no equipamento convencional, cujas amostras apresentaram expansibilidade durante o cisalhamento.

O efeito da escala de trabalho na determinação do ângulo de atrito do estéril, objeto desta pesquisa, ficou evidente, tanto no ensaio convencional quanto no ensaio de grande porte. A dependência entre a granulometria das amostras de estéril e a resistência ao cisalhamento do estéril foi percebida pela tendência do decréscimo do ângulo de atrito com a redução do diâmetro das suas partículas.

Por fim, destaca-se que para uma adequada avaliação de projeto, no que diz respeito ao comportamento geotécnico dos estéreis, são relevantes estudos desta natureza, uma vez que muitas estruturas são dimensionadas a partir de ensaios realizados com granulometrias reduzidas quando comparadas àquelas presentes em campo. De maneira geral, quando isto é feito, o resultado do projeto caminha no sentido da segurança, pois se projetam estruturas baseadas em parâmetros conservadores. No entanto, se bem avaliados, buscando um estudo do efeito de escala, estruturas que demandam de menores áreas de disposição podem ser propostas, gerando, como consequência, impactos ambientais significativamente menores.

REFERÊNCIAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1984, 6 p.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984, 8 p.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984, 13 p.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12004**: Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos. Rio de Janeiro, 1990, 6 p.
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12051**: Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos. Rio de Janeiro, 1991, 14 p.
- ASTM: American Society for Testing and Materials. **D3080/D3080M**: Direct shear test of soils under consolidated drained conditions. Washington, D. C., USA, 2011, 9 p.