

COMPORTAMENTO TENSÃO CISALHANTE-DEFORMAÇÃO DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO DISTRIBUÍDAS ALEATORIAMENTE

STRAIN-SHEAR BEHAVIOR OF IRON TAILINGS REINFORCED WITH RANDOMLY DISTRIBUTED POLYPROPYLENE FIBERS

G. Sotomayor, Juan Manuel; *Pontifícia Universidade Católica, RJ, Brasil, girao.sotomayor@gmail.com*
D.T. Casagrande, Michéle; *Universidade de Brasília, RJ, Brasil, mdtcasagrande@unb.br*

RESUMO

O presente trabalho analisa o comportamento mecânico e volumétrico de um rejeito de minério de ferro não reforçado e reforçado com fibras de polipropileno aleatoriamente distribuídas. O material foi coletado de uma barragem para deposição de rejeitos de ferro. Uma boa homogeneização fibra-rejeito foi obtida com um teor de fibras de 0,5% em peso seco da matriz, valor utilizado em pesquisas anteriores. Ensaios de cisalhamento direto convencional e de plano cisalhado com superfície polida foram feitos para gerar as envoltórias de resistência de pico e residual. Os ensaios foram feitos sob a condição submersa para manter drenagem livre entre o exterior e interior da caixa de ensaios durante as etapas de adensamento e cisalhamento e obter parâmetros efetivos. Tensões normais verticais de 25, 50, 100, 200 e 400 kPa foram utilizadas. Os resultados mostram que a adição da fibra incrementa os parâmetros de resistência de pico e residual de 32,8° a 36,7° e de 28,1 a 34,9° respectivamente. O reforço também muda a tendência volumétrica contrativa para dilatante e melhora a resposta na ruptura com um comportamento mais dúctil. Este tipo de reforço pode ser aplicado na manutenção de taludes de barragens de rejeito que tenham rompido em zonas onde exista a dificuldade de colocar um reforço geosintético planar. O uso do rejeito de minério de ferro reforçado providenciará melhores características de resistência à zona afetada visando ser uma resposta eficaz para um problema que requer uma rápida ação.

ABSTRACT

The present work analyzes the mechanical and volumetric behavior of an unreinforced and reinforced iron mine tailings with randomly distributed polypropylene fibers. The material was collected from a dam for the deposition of iron tailings. A good fiber-tailing homogenization was obtained with a fiber content of 0,5% by dry weight of the matrix, value used in previous research. Conventional direct shear and shear plane tests with a polished surface were made to generate the peak and residual strengths envelopes. The tests were done under the submerged condition to maintain free drainage between the exterior and interior of the test box during the steps of consolidation and shear to obtain effective parameters. Normal vertical stresses of 25, 50, 100, 200 and 400 kPa were used. The results show that the fiber addition increases the peak and residual strengths parameters from 32.8 ° to 36.7 ° and from 28.1 to 34.9 ° respectively. The reinforcement also changes the contractive volumetric tendency to dilatant and improves the rupture response with a more ductile behavior. This type of reinforcement can be applied in the maintenance of slopes of tailings dams that have ruptured in areas where it is difficult to place a planar geosynthetic reinforcement. The use of reinforced iron mine tailings will provide better resistance characteristics to the affected zone in order to have an effective response to a problem requiring rapid action.

1 - INTRODUÇÃO

O Ferro é um material amplamente utilizado na indústria principalmente como matéria prima em atividades como a produção de aço, a indústria da construção ou na fabricação de carros e produtos eletrodomésticos, entre outros. O material é retirado por meio de diferentes processos mecânicos e químicos nas plantas concentradoras para sua posterior venda às empresas siderúrgicas. A grande produção gera grandes quantidades de rejeitos, materiais que não são produtos de interesse comercial.

Diretrizes e documentos mencionam considerações para garantir a segurança das barragens a longo prazo (ICOLD, 2013; ANCOLD, 2011). A forma de armazenamento dos rejeitos é determinada pelo tipo de material, a topografia do local e as condições ambientais existentes. As metodologias empregadas para seu armazenamento são diversas, mas os critérios tecnológicos e econômicos adotados não devem comprometer o meio ambiente nem afetar a velocidade de produção do minério. O método economicamente mais atrativo para as empresas mineradoras é o alteamento pelo método de montante que normalmente utiliza o próprio rejeito de minério como material de construção para os diques de alteamento, suprimindo os custos derivados de utilizar materiais de empréstimo.

Os diferentes processos fazem que os rejeitos de minério de ferro apresentem diferentes propriedades índice, não se recomendando trabalhar com valores médios obtidos na literatura, portanto a caracterização físico química é de caráter primordial. Em tal sentido, como para o caso dos solos naturais, realizou-se um programa de caracterização física e química mediante ensaios de granulometria, limites de Atterberg, densidade relativa dos grãos, grau de acidez e compactação com proctor normal. Os rejeitos procedem de processos de desgaste mecânico e químico, portanto, se realizaram análises mineralógicas para descobrir se existe alguma restrição na escolha da fibra de reforço dependente dos constituintes químicos encontrados no rejeito.

O presente trabalho procura analisar a resposta do rejeito de minério de ferro utilizando o ensaio de cisalhamento direto convencional para determinar as mudanças no comportamento tensão cisalhante-deslocamento não reforçado e reforçado com fibras de polipropileno, e ensaios de plano cisalhado com superfície polida para tentar obter uma resposta do comportamento residual do material.

2 - ORIGEM E CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO REJEITO DE MINERIO DE FERRO

Os rejeitos pertencem a uma empresa privada dedicada à extração e processamento de ferro, que se encontra no Peru. O processo de geração dos rejeitos é como brevemente se descreve a seguir: os minérios são transportados por correias até o prédio de peneirado e britagem, conseguindo fragmentos menores que tem uma cominuição inicial até um máximo de 12 mm, esse material passa à etapa de concentrado onde o minério passa por mais duas fases de cominuição na moagem pré-primária e uma fase na moagem secundária passando à flotação em coluna. Dos espessados o concentrado passa para os tanques de estocagem sendo transportados por minero dutos, os rejeitos em polpa são transportados por tubos até as barragens de mineração.

Resultados de análises mineralógicas por fluorescência de raios X, efetuadas em amostras secas na estufa e destorroadas indicaram a presença de SiO_2 (84,04%), Fe_2O_3 (13,10%), Al_2O_3 (1,81%), SO_3 (1,04%) e outros (0.01%), próprios de este tipo de material e do processo. Estas porcentagens foram verificadas pelos análises de microscopia de varredura eletrônica.

Realizaram-se ensaios de granulometria mediante peneiramento e sedimentação utilizando amostras com secagem prévia segundo norma ABNT NBR-7181 (1984a), as porcentagens e características da curva granulométrica são apresentadas nos quadros 1 e 2 respectivamente.

Quadro 1 - Análise granulométrico do rejeito de minério de ferro

Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)		
		Fina (%)	Media (%)	Grossa (%)
0,90	21,58	54,70	21,06	1,76

Quadro 2 - Características da curva granulométrica

Diâmetro efetivo D10	0,0322
Diâmetro médio D50	0,1137
Coefficiente de uniformidade (Cu)	4,1
Coefficiente de curvatura (Cc)	1,3
Índice de vazios máximo (e max)	0,84
Índice de vazios mínimo (e min)	0,55

Utilizando o Sistema Único de Classificação de Solos (SUCS) o rejeito de minério de ferro classifica como uma areia siltosa (SM). Para verificar as porcentagens da fração menor a 0.0075 mm se utilizou um granulômetro laser avaliando o material com e sem defloculante de hexametáfosfato de sódio, não se encontrando variações com respeito às porcentagens dadas pela sedimentação confirmando o baixo teor de argila.

As características de compactação do rejeito foram obtidas utilizando ensaios dinâmicos de tipo Proctor normal utilizando a norma ABNT NBR-7182 (1986). O material foi inicialmente seco na estufa de 50° C e compactado após a adição da água destilada. O material foi reutilizado e neste trabalho não se realizou um estudo para determinar a influência na curva de compactação pela reutilização do material. A massa específica aparente seca máxima é 1,746 g/cm³ para um teor de umidade ótimo de 12,3%. Com o valor do Gs e a densidade máxima seca aparente se pode calcular o índice de vazios teórico à umidade ótima, portanto para um Gs=2,892 e $\gamma_d=1,746$ g/cm³ corresponde um e=0,656. Com os valores de e_{max}=0,84, e e_{min}=0,55 se calcula que o material possui uma densidade relativa (Dr) de 65%, portanto tem uma compactidade média.

3 - CARATERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS DA FIBRA DE POLIPROPILENO

Os monofilamentos de polipropileno apresentam-se em forma de pequenos pacotes de fibras que são desfiadas para serem misturadas com a matriz de rejeito. No processo de mistura é importante uniformizar as camadas de rejeito-fibra, para garantir uma boa distribuição que consiga um material homogêneo, para tal fim se deve evitar que as fibras entrem em contato e formem pelotas. As características das fibras obtidas pelos dados do fabricante se mostram no quadro 3. O teor de fibra utilizado é de 0,5% em peso seco do rejeito, esse valor foi utilizado em outras pesquisas que utilizaram fibras de polipropileno (Consoli et al., 2007; Consoli et al., 2009) devido que é o limite superior para garantir a homogeneização com a matriz.

Tipo	Polipropileno
Cor	Transparente
Diâmetro (mm)	0,03
Comprimento (mm)	24
Modulo de elasticidade (GPa)	5
Densidade Relativa	0,92

4 - ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1 - Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram talhados num molde de aço de 100 mm x 100 mm de lado e 20 mm de altura que foi subdividida para colocar 5 camadas e garantir melhor a uniformidade das fibras e a densidade relativa do material ($D_r=65\%$). O processo de moldagem foi igual para o rejeito com e sem fibra. Para a pesagem das fibras e do rejeito de ferro se utilizaram balanças de precisão de 0,001 g. e 0,01 g. respectivamente. O processo de mistura consistiu em colocar primeiro uma camada fina de rejeito e acima as fibras desfiadas manualmente para finalizar com outra camada de rejeito, finalmente se espalhava o teor de água correspondente à umidade ótima e mediante uma colher se procedia a misturar o conjunto. Visualmente se conseguiu uma distribuição uniforme das fibras.

4.2 - Equipamento

O equipamento de cisalhamento direto utiliza um motor elétrico que impulsa as engrenagens responsáveis da taxa de deslocamento. Seguindo as recomendações de Head (1994) utilizando os dados do adensamento a taxa de deslocamento calculada foi de 0.06 mm/min. Para a aplicação da carga vertical se utilizou um sistema de tipo pendural com o qual se conseguiu aplicar a carga com braço de alavanca. Durante o ensaio a força horizontal foi medida mediante um anel de carga instrumentado de 500 kg de capacidade, desenvolvido na PUC-Rio, enquanto que, os deslocamentos verticais e horizontais foram medidos por transdutores de deslocamento tipo LSCDT de 20 mm de comprimento (Fig.1).

4.3 - Ensaio de cisalhamento direto convencional e de plano cisalhado com superfície polida

Os ensaios foram feitos para tensões normais verticais (σ_n) de 25, 50, 100, 200 e 400 kPa para definir completamente o comportamento tensão deslocamento e o conseqüente ângulo de atrito (ϕ) e intercepto coesivo (c) não reforçado e reforçado. Se fizeram ensaios convencionais para determinar a resistência de pico e ensaios de plano cisalhado com superfície polida para determinar o comportamento residual. As etapas de adensamento e cisalhamento se realizaram sob condição submersa com o intuito de manter a drenagem da amostra e obter parâmetros efetivos.



Figura 1 – Equipamento de cisalhamento direto

A respeito da resistência de pico é bem sabido que o ensaio de cisalhamento direto possui limitações para reproduzir parâmetros de resistência que sejam fieis à realidade devido que se submete à amostra a um plano de ruptura estabelecido gerando um estado de tensões que é impreciso para sua determinação confiável. Este ensaio é utilizado nesta pesquisa devido a sua grande utilidade em trabalhos com diferentes tipos de solo devido que quando os deslocamentos laterais ocorrem em um terreno ligeiramente inclinado, o solo é submetido a uma trajetória de tensões semelhante ao cisalhamento direto simples (Olson e Mattson, 2008). Os ensaios de cisalhamento direto de plano cisalhado com superfície polida se realizam após o ensaio convencional (Fig. 2), no qual, se retira a caixa de cisalhamento do equipamento, e realiza-se o corte do corpo de prova passando um fio fino de aço ao longo da interfase das caixas superior e inferior, as quais são separadas para polir as respectivas superfícies que depois se colocam novamente em contato gerando a superfície de ruptura residual, finalmente a caixa é colocada no equipamento e o ensaio realiza-se na mesma velocidade de cisalhamento do ensaio convencional. O quadro 4 apresenta o programa dos ensaios realizados.

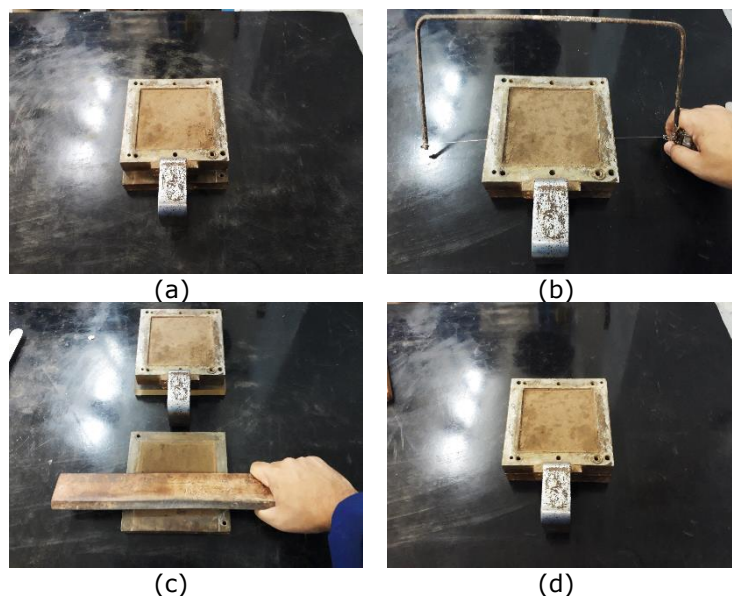


Figura 2 – Preparação do ensaio de cisalhamento direto de plano cisalhado com superfície polida
 (a) amostra após o ensaio de cisalhamento convencional (b) corte do plano cisalhado com fio de aço
 (c) polido da superfície cisalhada inferior e superior (d) colocação das caixas superior e inferior para ensaio

Quadro 4 - Programa de ensaios de cisalhamento direto		
Tipo de Ensaio	Sem Reforço (SR)	Reforçado (R)
Convencional	25kPa - SR	25kPa - R
	50kPa - SR	50kPa - R
	100kPa - SR	100kPa - R
	200kPa - SR	200kPa - R
	400kPa - SR	400kPa - R
Plano cisalhado com Superfície Polida	SP-25kPa - SR	SP-25kPa - R
	SP-50kPa - SR	SP-50kPa - R
	SP-100kPa - SR	SP-100kPa - R
	SP-200kPa - SR	SP-200kPa - R
	SP-400kPa - SR	SP-400kPa - R

5 - RESULTADOS E ANALISES

5.1 - Ensaio de cisalhamento direto convencional e de plano cisalhado com superfície polida

As curvas tensão cisalhante – deslocamento horizontal, dos ensaios convencional e de superfície polida não reforçado e reforçado, são apresentadas na Figura 3. Note-se que a rigidez inicial (pendente inicial das curvas tensão cisalhante-deslocamento) é similar no rejeito não reforçado e reforçado, mas com o deslocamento existe uma marcada diferença entre curvas sob a mesma tensão normal vertical. Também é visível que a tensão cisalhante de pico e o deslocamento horizontal são afetados pela presença da fibra, assim como o comportamento de pós pico.

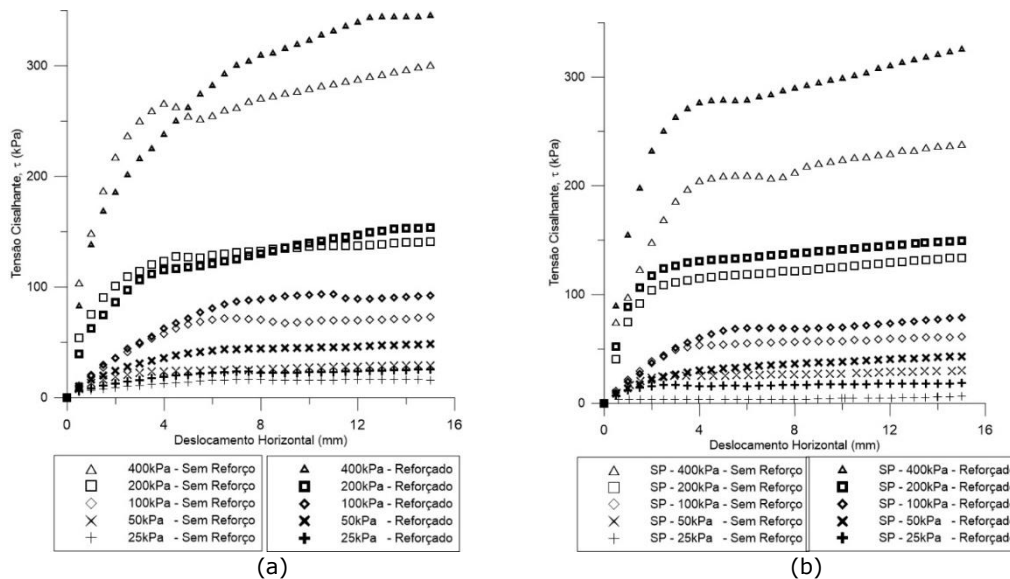


Figura 3 - Curvas Tensão cisalhante – deslocamento horizontal
 (a) convencional (b) plano cisalhado com superfície polida

No ensaio convencional, o rejeito sem reforço apresenta uma tensão de pico seguida de uma queda e um pequeno aumento de tensão produto do rearranjo dos grãos dado pela deformação da matriz oferecendo certa resistência ao deslocamento. O rejeito submetido a uma maior tensão normal alcança a tensão cisalhante de pico com um menor deslocamento horizontal porque o material fica mais rígido. No caso reforçado, a fibra começa agir na primeira fissura trabalhando como ponte para a transferência de tensões entre os segmentos separados de rejeito. O aparecimento da primeira fissura depende do nível de tensão normal.

O ensaio de plano cisalhado e superfície polida foi realizado como alternativa para medir a resistência residual. Neste caso a superfície de ruptura está bem definida portanto a resistência está dada pelo atrito de contato, isto se verifica pela inexistência do intercepto coesivo (Fig. 5b) em ambos os casos não reforçado e reforçado. Neste ensaio a fibra não atua mais como ponte de transferência entre os segmentos separados de rejeito portanto o acréscimo no ângulo de atrito que aparece no rejeito reforçado se deve à resistência ao arrancamento das fibras ancoradas em cada segmento, o atrito entre as superfícies cisalhadas em movimento, gera uma força no plano de contato que tenta tirar as fibras que encontram-se ancoradas se resistindo ao deslocamento.

5.2 - Perda da Rigidez Inicial

A perda total da rigidez inicial é um indicador da alteração produzida na estrutura do rejeito devido ao contínuo deslocamento. A evolução desta perda mostra como o rejeito atua quando reforçado. Para entender quando a fibra começa agir na matriz de rejeito utiliza-se a rigidez inicial como referência. A Figura 4 mostra a evolução da perda de rigidez inicial em porcentagem segundo o aumento do deslocamento horizontal para todos os ensaios não reforçados e reforçados.

No quadro 5 se mostram os deslocamentos mínimos com que se geram perdas de 25, 50, 75 e 100% do valor da rigidez inicial. Pode-se notar que tanto para o rejeito não reforçado como reforçado para todas as tensões perde-se o 50% da rigidez inicial com 1,0 mm de deslocamento, mas quando a rigidez inicial é afetada em um 75% a mais, existe uma variação visível indicando que o reforço começa agir na matriz de rejeito evidenciando um comportamento mais dúctil que adianta a perda total de rigidez inicial em deslocamentos maiores comparados com o rejeito não reforçado.

Quadro 5 - Perda da Rigidez inicial		
Perda da Rigidez Inicial (%)	Sem Reforço (mm)	Reforçado (mm)
25	1,0	1,0
50	1,0	1,0
75	1,5	2,5
100	4,5	7,5

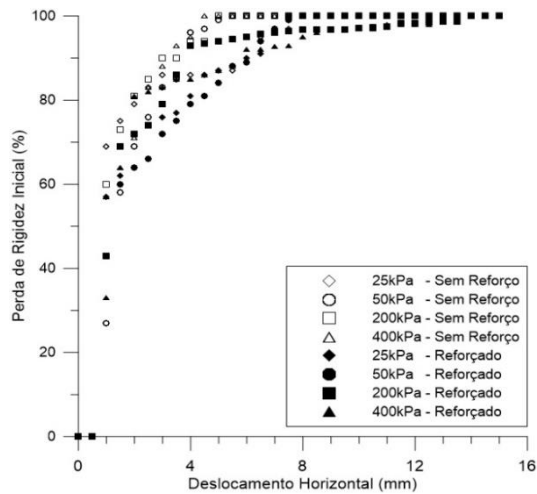


Figura 4 - Evolução da perda de Rigidez Inicial em tensões normais (i) baixas (25, 50kPa) e (ii) altas (200, 400 kPa)

A perda de rigidez nos indica que para qualquer valor de tensão normal a resistência da matriz se reduz a partir de um deslocamento de 4,5 mm, enquanto que na matriz reforçada a partir de 7,5 mm, portanto se pode deduzir conservadoramente que a fibra começa atuar a partir dos 4,5 mm de deslocamento, além de que as curvas tensão cisalhante versus deformação mostrem que o instante em que a fibra começa atuar é dependente da tensão normal aplicada.

5.3 - Parâmetros de Resistência

Os parâmetros de resistência do rejeito não reforçado e reforçado são obtidos por regressão linear da envoltória de resistência com um coeficiente de correlação de 0,99. As envoltórias de resistência dos ensaios convencional e de plano cisalhado com superfície polida se apresentam na Figura 5. Os valores da tensão normal, tensão cisalhante e deslocamento horizontal à ruptura do rejeito não reforçado e reforçado são apresentados no quadro 6.

Quadro 6 - Resultados do programa experimental

Ensaio	Teor de Fibra (%)	Tensão Vertical à ruptura (kPa)	Tensão cisalhante à ruptura (kPa)	Deslocamento Horizontal à ruptura (mm)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)	Coeficiente de Correlação (R ²)
Convencional	0,00	26,6	16,4	7,5	32,8	0,0	0,99
		51,7	25,2	7,0			
		105,5	71,6	7,0			
		207,5	127,5	4,5			
		407,7	266,2	4,5			
Plano Cisalhado com Superfície Polida	0,00	28,9	6,1	15,0	28,1	0,0	0,99
		56,3	29,9	15,0			
		115,2	61,2	15,0			
		234,8	133,8	15,0			
		460,2	238,5	15,0			
Convencional	0,50	26,9	23,6	5,5	36,7	2,2	0,99
		58,8	44,8	6,5			
		110,1	93,8	11,0			
		232,8	153,6	12,5			
		449,3	345,5	12,5			
Plano Cisalhado com Superfície Polida	0,50	29,5	18,5	15,0	34,9	0,0	0,99
		58,8	43,1	15,0			
		115,2	78,8	15,0			
		234,3	149,2	15,0			
		449,2	315,7	15,0			

Como as curvas tensão-deformação do rejeito reforçado não apresentam uma tensão cisalhante de pico adotou-se o critério proposto por De Campos e Carrillo (1995) onde se assume que a matriz rompe quando a curva tensão-deslocamento atinge uma inclinação constante ou nula.

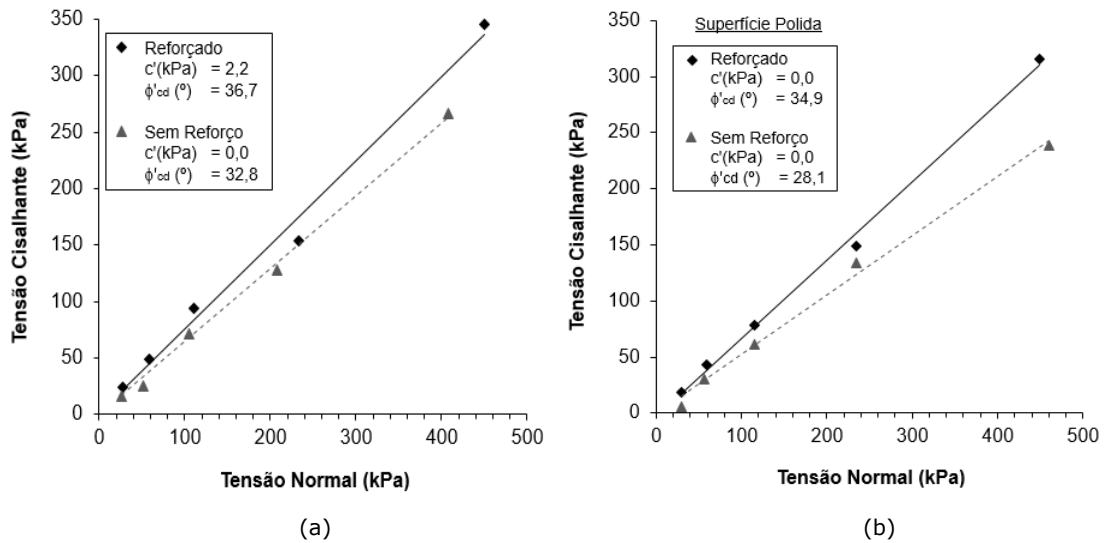


Figura 5 - Envolvórias de resistência
(a) convencional (b) plano cisalhado com superfície polida

Note-se que a adição da fibra incrementa os parâmetros de resistência tanto nos ensaios convencionais como de plano cisalhado com superfície polida. Sob baixas tensões normais a adição de fibra atua em detrimento da resistência devido que uma tensão normal baixa não permite que a fibra preencha os vazios na matriz e ao contrario sua adição gera mais vazios, altas tensões normais seguram a matriz com a fibra reduzindo os vazios e melhorando a interação matriz-fibra. O intercepto coesivo de valor nulo (Fig. 5b) verifica que a condição residual foi plenamente atingida no ensaio de plano cisalhado com superfície polida.

5.4 - Mobilização do ângulo de atrito e do intercepto coesivo

A mobilização dos parâmetros de resistência, é obtida mediante os valores de tensão cisalhante e tensão normal obtida cada 0,5 mm de deslocamento. Em cada ponto realizou-se a envoltória de resistência para obter a gráfica da mobilização dos parâmetros durante todo o ensaio.

Os resultados apresentados na Figura 6(a) correspondem ao ensaio convencional. Note-se que o rejeito não reforçado apresenta um ângulo de atrito de pico enquanto que o rejeito reforçado aumenta com o deslocamento. O intercepto coesivo apresentado corresponde ao rejeito reforçado devido que o rejeito não reforçado apresentou uma coesão zero.

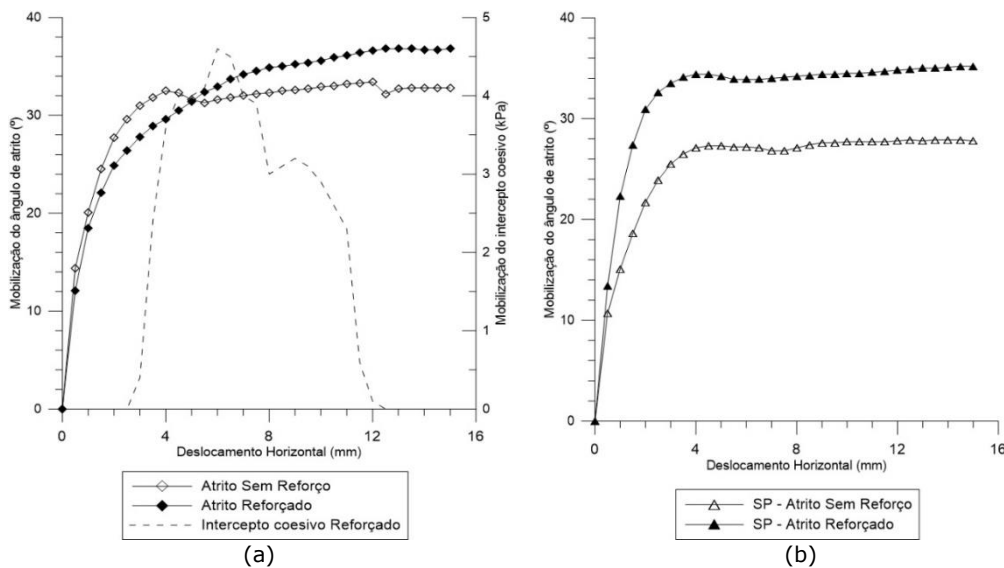


Figura 6 - Mobilização do ângulo de atrito e do intercepto coesivo
(a) convencional (b) de plano cisalhado com superfície polida

Observa-se no deslocamento de 4,5 mm, descrito anteriormente como o deslocamento onde se alcança a perda total da rigidez da matriz não reforçada, que o ângulo de atrito continua incrementando até o final do ensaio enquanto que no material não reforçado sofre uma queda após o valor de pico. O intercepto

coesivo mobilizado da amostra reforçada, atinge um valor de 4 kPa em 4,5 mm de deslocamento, mostrando o início da interação fibra-matriz que depois chega a um valor máximo de 4,5 kPa. Este valor de intercepto coesivo de pico coincide com a queda do ângulo de atrito não reforçado, portanto na amostra reforçada, uma vez que a estrutura dos grãos de rejeito falha, a fibra desempenha sua função de segurar os segmentos separados de rejeito gerando um intercepto coesivo temporal. Como o deslocamento avança, a resistência ao arrancamento da fibra é superada e consequentemente o intercepto coesivo é reduzido até zero.

Na Figura 6(b), apresenta-se a gráfica da mobilização do ângulo de atrito no ensaio de plano cisalhado com superfície polida mostrando que as amostras não reforçadas e reforçadas conseguem permanecer estáveis depois de atingir um valor de pico. Note-se que além de ter rompido o rejeito, a adição de fibra fornece um acréscimo ao atrito residual entre os segmentos separados de rejeito, fato explicado em parágrafos anteriores.

5.5 - Variação Volumétrica

As curvas de deslocamento horizontal e vertical mostram que quando o rejeito não possui reforço seu comportamento é contrativo mas quando tem inseridas as fibras inicialmente se apresenta como contrativo e depois muda para um comportamento dilatante. Note-se na Figura 7, que a mudança nos gráficos começa aproximadamente a partir de 4,5 mm de deslocamento. Portanto se pode afirmar que a presença da fibra muda o comportamento de contrativo a dilatante.

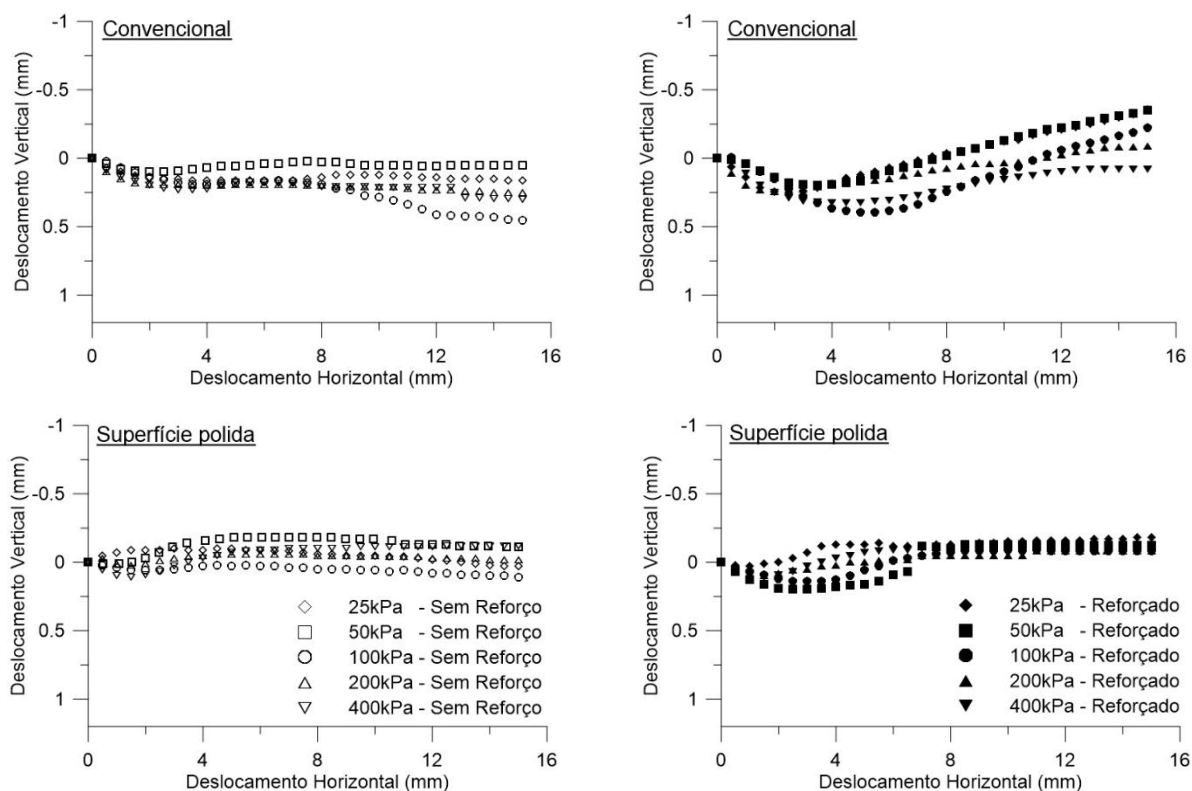


Figura 7 - Variação volumétrica do rejeito não reforçado e reforçado

Nos gráficos dos ensaios de plano cisalhado com superfície polida, se observa que os deslocamentos no rejeito não reforçado permanecem constantes mostrando que a fase residual foi totalmente atingida. Enquanto que, no rejeito com reforço existe uma pequena compressão que pode ser porque as fibras geram vazios na superfície que é preenchida pelo arranjo dos grãos durante o cisalhamento até ficar estável.

6 - CONCLUSÕES

O presente trabalho visou avaliar o comportamento de um rejeito de minério de ferro não reforçado e reforçado com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente, para tal finalidade, utilizou-se o ensaio de cisalhamento na condição submersa do tipo convencional e de plano cisalhado com superfície polida. A seguir se apresentam as conclusões baseadas nas informações obtidas no trabalho.

O reforço de fibras de polipropileno inseridas aleatoriamente na matriz de rejeito de minério de ferro melhora significativamente o valor do ângulo de atrito de 32,8° a 36,7°, enquanto que, o incremento

favorável no intercepto coesivo é desprezível. Ensaio de plano cisalhado com superfície polida se realizaram visando obter uma resposta residual das amostras não reforçadas e reforçadas. Comprovou-se que após a ruptura, a adição de fibras conseguiu elevar o ângulo de atrito de 28,1° a 34,9° mantendo uma coesão zero própria de um material cisalhado;

Realizou-se uma avaliação da perda da rigidez inicial se comprovando que o reforço aumenta a resposta dúctil do material, fato demonstrado, devido que a perda total da rigidez inicial do rejeito não reforçado se alcançou em um deslocamento de 4,5 mm enquanto que o rejeito reforçado em 7,5 mm;

Envoltórias de resistência com os valores de tensão cisalhante e tensão normal a cada 0,5 mm determinaram a mobilização dos parâmetros de resistência. O rejeito não reforçado alcançou um ângulo de atrito pico de 32,8° em 4,0 mm de deslocamento, enquanto que a amostra reforçada, não apresentou pico, mostrando um incremento constante do ângulo de atrito até um valor de 36,7° em 15 mm;

O valor da coesão no material não reforçado foi zero. No caso reforçado, nota-se que a mobilização do intercepto coesivo passa por uma etapa de expansão, pico e queda cuja interpretação física corresponde à resistência ao cisalhamento da estrutura do rejeito, a interação da fibra-rejeito e o arrancamento das fibras que se encontram no plano de cisalhamento, respectivamente. O ensaio de plano cisalhado e superfície polida mostrou que o ângulo de atrito do material reforçado também aumenta na condição residual. Quando a condição residual é alcançada, as fibras fornecem um acréscimo no atrito de contato oferecendo uma resistência adicional ao deslocamento. As gráficas de deslocamento horizontal e vertical comprovaram que a adição de fibra muda o comportamento volumétrico do rejeito de uma resposta contrativa para dilatante.

Em resumo, uma adição de 0,5% de fibra de polipropileno à matriz de rejeito de minério de ferro melhora as características de resistência e de deformação tanto nas fases de ruptura como residual, recomendando-se seu uso na manutenção de taludes de rejeito colocando o mesmo material com fibra, melhorando as características de resistência na zona afetada.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seu agradecimento para as instituições que deram suporte técnico e econômico: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos auxílios dados para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT (1984a) - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Análise granulométrica. NBR-7181.
- ABNT (1986) - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Ensaio de Compactação. NBR-7182.
- ABNT (1984b) - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica - NBR-6508.
- Australian Committee on Large Dams, ANCOLD (2011) - *Guidelines on tailings dams – planning, design, construction, operation and closure*. Austrália. 60 p.
- Consoli, N. C., Casagrande, M. D. T. e Coop, M. R. (2007) - Performance of a fiber-reinforced sand at large shear strains. *Géotechnique*, vol. 57, pp. 751–756.
- Consoli N. C., Vendruscolo M. A. e Foninia A. (2009) - Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextils and Geomembranes*, vol. 27, pp. 196–203.
- De Campos, T.M.P e Carrillo, C.W. (1995) - Direct Shear Testing on an Unsaturated Soil from Rio de Janeiro. *Unsaturated Soils*, Alonso & Delage (eds.), pp. 31-38.
- Head K. H. (1994) - Manual of Soil Laboratory Testing. 2nd Edition. *Vol. 2. Permeability, Shear Strength and Compressibility Test*. pp. 189-240.
- International Commission on Large Dams, ICOLD (2013) - *Bulletin 153 - Sustainable Design and Post-closure Performance of Tailings Dams*. 86 p.
- Olson S. M. e Mattson B. M. (2008) - Mode of share effects on yield and liquefied strength ratios. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 45, pp. 574-587.