

Estudo da Resistência ao Cisalhamento dos Solos Residuais Saprolíticos de Filito da Baixada Cuiabana.

Renan Rodrigues Pires
IFMT, Cuiabá, Brasil, renanrodrigues.eng@outlook.com

Ilco Ribeiro Júnior
IFMT, Cuiabá, Brasil, ilco.ribeiro@cba.ifmt.edu.br

RESUMO: As rupturas de taludes e fundações rasas ocorrem por cisalhamento do solo. O solo da Baixada Cuiabana é do tipo residual saprolítico de filito, que é uma rocha metamórfica com xistosidades e planos de fratura. Através de ensaios físicos de caracterização geotécnica, classificou-se o solo da Baixada Cuiabana como um Silte Arenoso que apresenta características expansivas devido à presença de argilominerais ativos. O solo saprolítico mantém presente as características e estruturas da rocha de origem. Este solo é geralmente encontrado com umidade abaixo da umidade de saturação, gerando sucção. A sucção foi levada em conta nos resultados apresentados, pois influencia diretamente a resistência ao cisalhamento. Verificou-se a anisotropia do material através do ensaio de cisalhamento direto de amostras indeformadas com planos paralelos e perpendiculares ao plano de corte imposto pela prensa. A quantificação da contribuição da estrutura do solo foi tomada como a diferença da resistência ao cisalhamento da amostra indeformada com a amostra compactada a energia normal. Para verificar a influência da sucção na resistência ao cisalhamento do solo, repetiram-se os ensaios de cisalhamento com a amostra saturada. Com o ensaio de cisalhamento, obteve-se o valor do ângulo de atrito e coesão do solo, que foram comparados em todos os planos e condições de saturação. Como resultado observa-se que existe anisotropia no solo da Baixada Cuiabana, com o Coeficiente de Anisotropia (“CA”), no valor de 1,72 para amostras na umidade natural e 1,95 para amostras saturadas para tensões de 100 kPa. O solo apresentou Coeficiente de Estrutura, no valor de 1,46 no plano paralelo e 2,52 no plano perpendicular na umidade natural. O plano perpendicular apresentou coesão de 89,28 kPa na umidade natural e 126,32 kPa com a amostra saturada.

PALAVRAS-CHAVE: Anisotropia; resistência ao cisalhamento; solo saprolítico de filito.

1 INTRODUÇÃO

O colapso em fundações diretas, barragens, aterros, taludes e outras obras de terra ocorrem por ruptura ao cisalhamento. A resistência ao cisalhamento de um solo é um dos principais fatores que fornecem estabilidades aos maciços. Quando um maciço se desestabiliza, ocorre o deslizamento de terra, sendo um desastre que, geralmente, causa graves danos patrimoniais e, por vezes, vítimas fatais. O estudo da resistência ao cisalhamento do solo tem o objetivo de trazer qualidade às obras, evitando acidentes e fornecendo segurança à população, por isso é importante cada vez mais pesquisas

variando-se as condições encontradas em campo para observar quais condicionantes podem trazer riscos.

Por Cuiabá ser uma região populosa e estar em uma ascensão construtiva de verticalização, há cada vez mais necessidade de estudos das características do seu solo, para aumentar a segurança nas escavações, fundações e estruturas de contenções executadas na região. Na Baixada Cuiabana situada no Estado de Mato Grosso, devido à rocha-mãe estar bem superficial e o clima ser de região tropical, os solos são saprólitos jovens em estado de degradação.

Segundo Vecchiato (1987) apud Ribeiro Júnior (2005), a Baixada Cuiabana está localizada em uma depressão que dá início à Bacia Sedimentar do Pantanal. Esta área é constituída por rochas metamórficas do Grupo Cuiabá, pertencente ao grande cinturão de dobramentos do Paraguai. A Baixada Cuiabana apresenta solos saprolíticos das rochas metassedimentares formadoras do Grupo Cuiabá, geralmente filitossericíticos ou carbonosos, com xistosidades, estratificações plano-paralelas e clivagem ardosiana. A parte norte e central da Baixada Cuiabana, regiões sobre a Formação Miguel Sutil, apresentam solos argilo-siltosos por toda a formação. A região Sul, sobre a Formação Rio Coxipó apresenta solos areno-siltosos. Segundo Futai (2005), o solo da baixada cuiabana é predominantemente não saturado e com pequeno índice de vazios.

Os solos da Baixada Cuiabana apresentam estratificações herdadas das rochas metassedimentares que os originaram. Estas estratificações podem gerar valores diferentes de resistência ao cisalhamento, ângulo interno e coesão do solo dependendo do ângulo de aplicação da força e das estratificações. Futai (1995) estudou a relação entre a resistência ao cisalhamento do solo em diversas posições das estratificações em relação à resistência ao cisalhamento do solo em relação ao plano paralelo em um solo residual e estabeleceu que esta razão fosse denominada de “CA” (coeficiente de anisotropia).

Além da resistência variar em relação aos planos analisados da estrutura indeformada, um solo com a estrutura destruída (solos desagregados e posteriormente compactados) apresenta valores de resistência ao cisalhamento, ângulo interno e coesão diferente dos apresentados pelos ensaios na estrutura indeformada justamente por estes solos não apresentarem a estrutura herdada da rocha mãe.

Quando se pensa em estrutura do solo, pensamos em um arranjo das partículas do solo não explicados pelo histórico de tensões. Nos solos pouco intemperizados (saprolíticos), a estrutura é influenciada pela rocha mãe, pois o solo carrega suas características. São materiais complexos e heterogêneos, principalmente

quando a rocha-mãe é metamórfica. Boszczowski (2008) disse que a estrutura de um solo pode ser definida como a diferença de comportamento do solo no estado indeformado com o comportamento do solo no estado amolgado, mantido a mesma sucção e estado de tensões.

A sucção é uma tensão existente nos solos não saturados devido aos “caminhos” de ar existentes no solo. De acordo com Fredlund et al. (1978) apud Delgado (2002) foram identificadas relações associando a resistência ao cisalhamento com a sucção utilizando ensaios de sucção controlada.

No presente trabalho foi realizada a caracterização da amostra do solo cuiabano quanto aos parâmetros de caracterização física, podendo assim classificar geotecnicamente o material. Foram realizados os ensaios de resistência ao cisalhamento direto nas condições compactada e indeformada, nos planos paralelos e perpendiculares às xistosidades, na condição saturada e de umidade natural, podendo obter o valor da resistência conferida pela estrutura da amostra, em relação à amostra amolgada, como fez Boszczowski (2008), e obter a relação entre a resistência ao cisalhamento do plano perpendicular pelo plano paralelo, obtendo o coeficiente “CA”, estabelecido por Futai (1995). Estes ensaios foram realizados na condição lenta, adensada, dando tempo para a dissipação de toda a pressão neutra.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Local de Estudo

O solo foi coletado na obra do Edifício Torres do Parque, edificação que conta com duas torres de 20 pavimentos, localizado na Avenida Miguel Sutil, na cidade de Cuiabá-MT, conforme Figura 1. Trata-se de um solo saprolítico, cuja rocha de origem é o filito de cor amarelo mostarda, com estratificações e xistosidades visíveis a olho nu, bem característico da Baixada Cuiabana. Este local pertence à Formação Miguel Sutil, dentro do grupo Cuiabá.



Figura 1. Local da coleta de amostra de solo: AV. Miguel Sutil, próximo à entrada do Centro de Eventos do Pantanal.
Fonte: Adaptado do Google Earth.

2.2 Extração e coleta

A coleta foi realizada conforme o método de extração de amostras indeformadas desenvolvido pelos professores de mecânica dos solos da Escola Politécnica de São Paulo e conforme o procedimento da NBR 9820/97 - Coleta de Amostras Indeformadas de Solos, com dimensões de, aproximadamente, 30 x 30 x 30 cm.

2.3 Preparação das amostras

Os ensaios de caracterização foram realizados com amostras amolgadas, a partir do material que foi desagregado durante a extração das amostras indeformadas para os ensaios de resistência. Depois de preparado, o material ficou armazenado em sacos plásticos devidamente identificados, conforme prescreve a NBR 6457/86 - *Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*.

3 ENSAIOS LABORATORIAIS

3.1 Análise granulométrica

Devido ao solo não apresentar fração graúda na fase de preparação da amostra, o ensaio de análise granulométrica foi realizado em duas etapas: sedimentação com defloculante e

peneiramento fino, conforme prescreve a NBR 7181/84 - *Solo - Análise granulométrica*.

3.2 Limites de Atterberg

O ensaio de limite de liquidez foi realizado conforme prescreve a NBR 6459/84 - *Solo - Determinação do limite de liquidez* e o ensaio de limite de plasticidade foi realizado conforme prescreve a NBR 7180/88 - *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. E a partir dos resultados encontrados calculou-se o índice de plasticidade classificando então o solo através da Carta de Casagrande.

3.3 Compactação

Segundo Ribeiro Júnior (2005), o solo da Baixada Cuiabana é expansivo. Este autor relata que os resultados para ensaios de compactação utilizando o procedimento puramente como descreve na norma ABNT 7182/86 produz resultados errôneos para as curvas de compactação dos solos da Baixada Cuiabana, com instabilidades e não mostrando um ponto de umidade ótima. Ribeiro (2009) estudou métodos alternativos de preparo da amostra de solo expansivo da Baixada Cuiabana para ensaio de compactação sem reuso, desenvolvendo um método de preparação da amostra que estabiliza a curva de compactação, fazendo com que ela volte a ter o formato típico com ramo seco, ramo úmido e umidade ótima.

Adotou-se, portanto, para este estudo, o método desenvolvido para preparação de amostras por Ribeiro (2009) e a NBR 7182/86 - *Solo - Ensaio de Compactação*.

3.4 Cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é realizado para definir diversos parâmetros de um solo, dentre eles a resistência ao cisalhamento, o ângulo de atrito interno e a pressão neutra. Os ensaios foram realizados com as amostras indeformadas de solo. Estas amostras foram moldadas no anel padrão cilíndrico da prensa, que possui as dimensões de 60 mm de diâmetro e 30 mm de altura.

Os ensaios foram realizados com as xistosidades paralelas (PAR) e perpendiculares (PER) ao plano de corte. Também foram realizados ensaios com a amostra deformada compactada na energia do proctor normal (COM). Como o equipamento não permitia a verificação da sucção em tempo real e como se deve considerar a influência da sucção na resistência ao cisalhamento das amostras, realizaram-se os ensaios de cisalhamento direto na condição de umidade natural (NAT) e na condição saturada (SAT).

A amostra foi considerada na condição saturada quando todo o sistema de inserção da amostra na prensa foi inundado de uma vez, 24 (vinte e quatro) horas antes da realização do

ensaio de cisalhamento, para que haja tempo suficiente para a saturação da amostra.

A velocidade de deslocamento do carrinho para cisalhamento da amostra foi de 0,02 mm/min, velocidade adotada para que a poropressão fosse dissipada durante a realização do ensaio de cisalhamento. Como não há normatização nacional para o ensaio de cisalhamento direto, a referência adotada foi a ASTM-D 3080/98 - *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Granulometria

A Figura 2 mostra um solo sem pedregulhos, com alguma presença de areia e uma predominância de finos, que em sua maioria absoluta se encontra na fração silte. Observa-se também que a forma da curva leva a um solo com granulometria mal graduada, com mais de 70% de sua composição sendo da fração silte. Também existe um pouco de areia, cerca de 20%, o que não rege seu comportamento. De uma forma geral, o solo estudado apresenta 0% de pedregulho, 7% de areia grossa, 11% de areia média, 4% de areia fina, 71% de silte e 7% de argila, o que o classifica como solo silte arenoso.

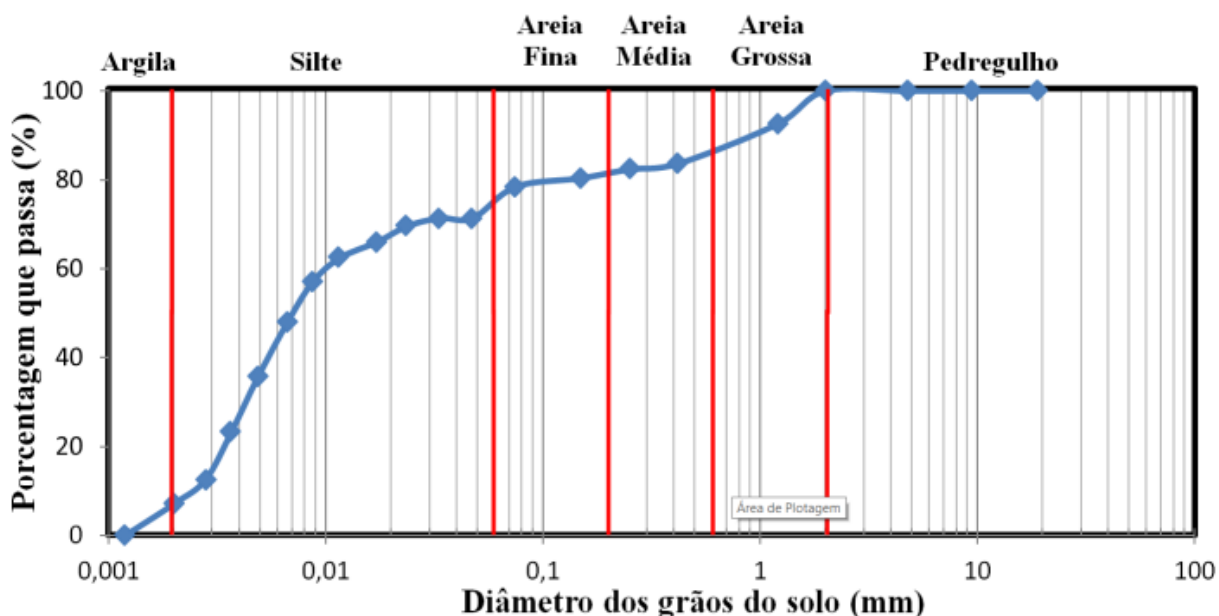


Figura 2. Curva Granulométrica

4.2 Limite de liquidez

Na Figura 3 obteve-se o Limite de Liquidez (WL), cujo valor após traçar a linha de tendência é de 39%, valor típico dos solos finos e aponta para um solo que possui coesão natural.

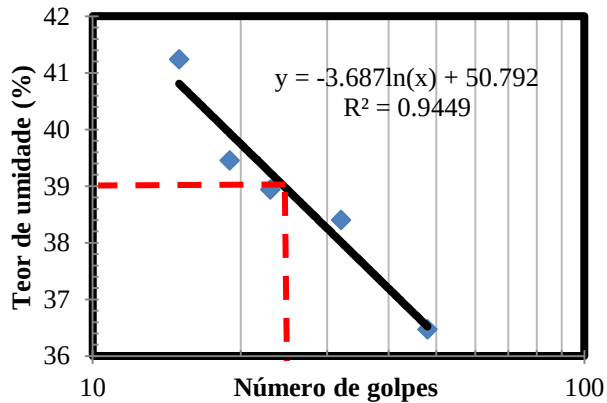


Figura 3. Limite de liquidez (WL) do solo saprolítico de filito.

4.3 Limite de plasticidade

O limite de Plasticidade (WP) obtido pela média de três pontos analisados mostra o valor de 18% como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados do ensaio de Limite de Plasticidade.

Limite de Plasticidade			
Teor de umidade	18%	20%	17%
Média - WP	18%		

4.4 Índice de plasticidade

O valor do Índice de Plasticidade (IP) encontrado para o solo analisado foi de 21%, conforme observado na Tabela 2.

Tabela 2. Determinação do Índice de Plasticidade (IP).

Índice de Plasticidade	
WL	39%
WP	18%
IP	21%

4.5 Carta de Casagrande

Com o valor de WL e de IP, podemos classificar a fração fina do solo (Figura 4). A fração fina do solo foi classificada como um solo CL, ou seja, uma Argila de Baixa Compressibilidade.

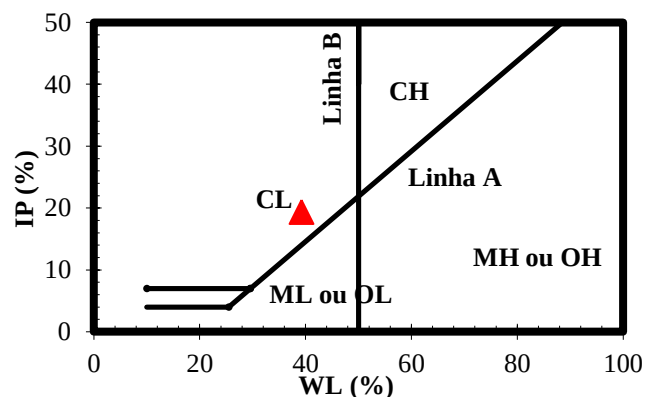


Figura 4. Carta de Casagrande do solo em estudo

4.6 Curva de compactação

Como pode ser visto na Figura 5, a umidade ótima obtida pelo método de Ribeiro (2009) para este solo foi de 19%. Esta umidade foi utilizada para a realização da compactação o solo sem reuso de onde se retirou a amostra para ser utilizada no ensaio de cisalhamento direto com amostra compactada à energia normal.

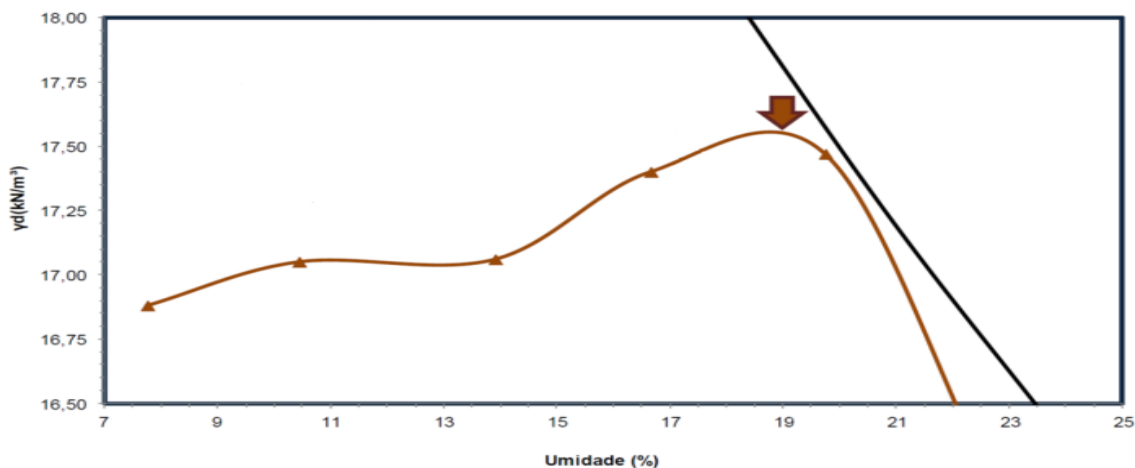


Figura 5. Curva de compactação de solos expansivos conforme proposto por Ribeiro (2009)

4.7 Cisalhamento direto na umidade natural

Observa-se, na Figura 6, a envoltória de resistência obtida para os solos com a umidade natural e ótima. Pode-se observar que o plano perpendicular é o que apresenta as maiores resistências em todas as condições de carga.

O ângulo de atrito do plano perpendicular e do plano paralelo apresentam valores próximos, porém a coesão do plano perpendicular é maior, deslocando a envoltória de resistência para cima, apresentando valor de resistência ao cisalhamento maior em todas as tensões. A amostra compactada apresenta o menor ângulo de atrito entre eles, mostrando a grande influência que a estrutura tem no valor do ângulo de atrito para amostras à umidade natural, independente do plano analisado em relação à amostra compactada.

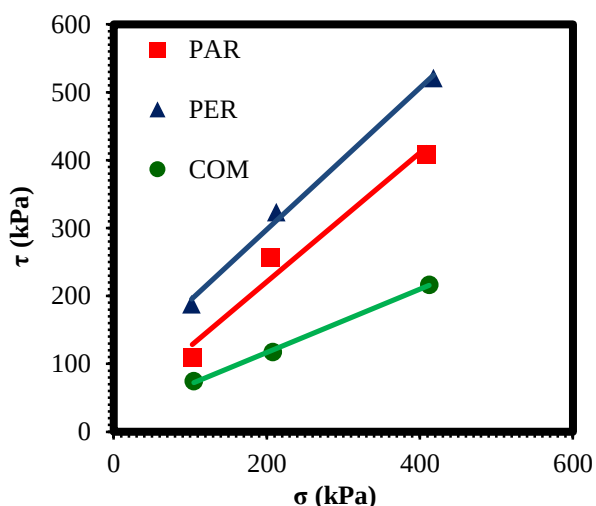


Figura 6. Envoltória de resistência ao cisalhamento dos solos na umidade natural.

4.8 Cisalhamento direto com amostra saturada

Observa-se na Figura 7, a envoltória de resistência obtida para os solos saturados. Pode-se observar que o plano perpendicular é o que apresenta as maiores resistências em todas as condições de carga. Os ângulos de atrito do plano perpendicular saturado, do solo paralelo saturado e do solo compactado saturado possuem praticamente o mesmo ângulo de atrito, sendo a resistência do solo no plano perpendicular maior devido a maior contribuição da parcela da coesão neste estado.

No plano perpendicular, a resistência de ruptura dos solos com baixas tensões normais é maior que as no plano paralelo, devido exclusivamente ao ganho de coesão. Portanto, a diferença na resistência ao cisalhamento pelo ângulo de corte se dá, principalmente, a coesão. Para tensões normais acima de 400 kPa, nota-se que o incremento de resistência ao cisalhamento aumenta mais no plano paralelo que no perpendicular, para um nível de tensão onde a interferência do plano de corte na resistência ao cisalhamento seja minimizada pelas altas tensões normais.

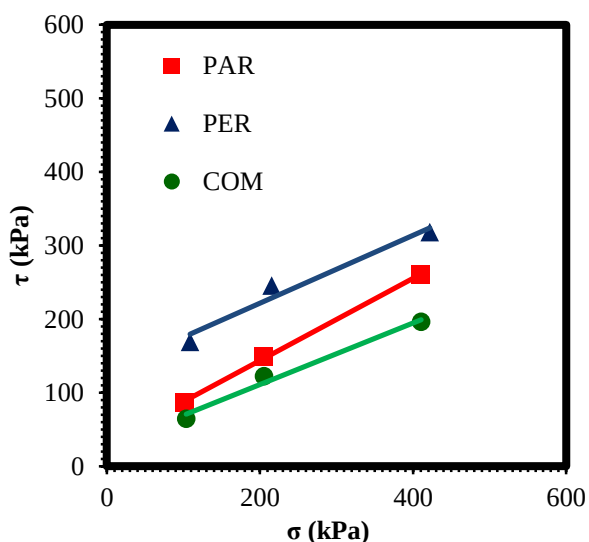


Figura 7. Envoltória de resistência ao cisalhamento dos solos na saturação.

4.9 Ângulo de atrito e coesão

Pode-se observar, na Tabela 3, que o valor do ângulo de atrito da condição natural é superior ao valor de ângulo de atrito da condição saturada e que, nas amostras indeformadas, os ângulos de atrito são governados pela condição de saturação da amostra. Observa-se também que qualquer posição de amostra indeformada apresenta ângulo de atrito maior do que a amostra compactada, demonstrando que a presença da estrutura, em qualquer posição, aumenta o ângulo de atrito do solo.

A coesão foi a grande revelação deste estudo. Foi descoberto que a coesão é 30% maior na condição saturada do que na condição natural e que, principalmente, ela é três vezes maior na posição perpendicular do que na posição paralela, independente se saturada ou

não a amostra. A partir deste fato, atribui-se ao valor de coesão o incremento de resistência ao cisalhamento devido à condição de estrutura da amostra. Porém, mesmo que a coesão seja maior nas amostras saturadas que nas amostras na umidade natural, o ângulo de atrito consideravelmente superior das amostras na umidade natural faz com que a maior resistência ao cisalhamento se apresente nesta condição.

Tabela 3. Comparativo dos valores de ângulo de atrito interno e coesão das amostras de cisalhamento.

Amostra		ϕ' (°)	c' (kPa)
Natural	Paralelo	43,48°	31,21
	Perpendicular	46,21°	89,28
	Compactado	24,97°	23,67
Saturado	Paralelo	27,55°	37,53
	Perpendicular	25,68°	126,32
	Compactado	22,76°	27,09

4.10 Coeficiente de estrutura

Realizando a comparação das resistências ao cisalhamento como proposto por Boszcowski (2008), pode-se concluir que a resistência devido à estrutura é maior no plano perpendicular do que no plano paralelo, independente da condição de saturação. Observa-se, na Figura 8, uma estabilidade nos coeficientes de estrutura em todos os casos, exceto na condição do corte perpendicular saturado, onde há um decréscimo progressivo nos valores do coeficiente de estrutura.

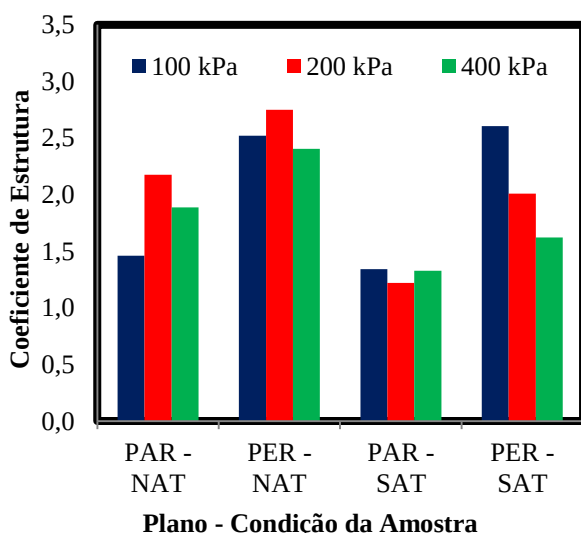


Figura 8. Coeficiente de estrutura conforme proposto por Boszcowski (2008)

4.11 Coeficiente de anisotropia

Utilizando-se o método de análise utilizado por Futai (1995), determina-se o coeficiente de anisotropia dos solos nas condições saturadas e na umidade natural, mostrados na Figura 9. Pode-se observar que o coeficiente de anisotropia é mais estável na umidade natural do que na condição saturada, e que, como pode se observar na imagem abaixo, a diferença da resistência conferida pela estrutura do solo na posição perpendicular em relação à paralela diminui quanto maior a tensão normal aplicada.

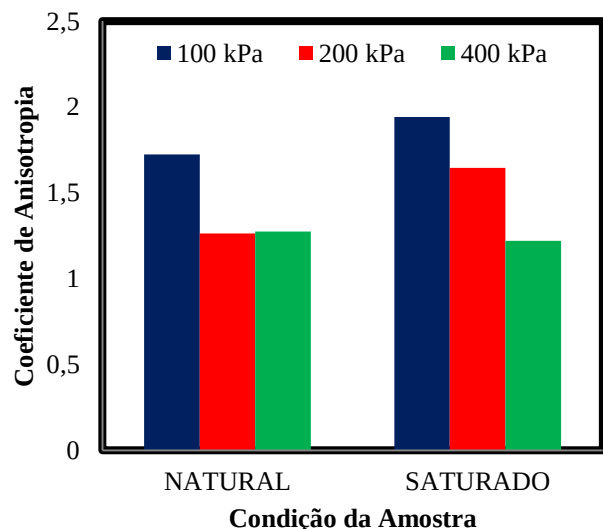


Figura 9. Coeficiente de anisotropia conforme proposto por Futai (1995).

5 Conclusão

O solo analisado foi caracterizado como um solo saprolítico de filito da Baixada Cuiabana. A curva granulométrica mostra claramente um silte arenoso, porém os limites de Atterberg com a carta de Casagrande classificam a parte fina deste solo como uma Argila de baixa compressibilidade. Pode-se concluir que a argila interfere no comportamento deste solo, pois, embora sua fração granulométrica seja pequena, este solo se comporta como uma Argila de baixa compressibilidade, embora com o ponto na carta de Casagrande próximo à Linha A.

A anisotropia do solo saprolítico é determinante para o valor da resistência ao cisalhamento, principalmente na posição perpendicular ao plano de corte quando

aplicadas pequenas tensões normais. Para tensões maiores, a presença da anisotropia ainda colabora com a resistência, mas a interferência do plano de cisalhamento tende a decrescer com o aumento da tensão normal.

A estrutura do solo mostrou-se determinante para o aumento da resistência ao cisalhamento do solo, pois mesmo a amostra indeformada no seu plano de menor segurança apresenta resistência superior à amostra desestruturada.

Quase todas as amostras saturadas perderam algum valor de resistência devido à neutralização da sucção, principalmente na posição paralela a altas tensões, onde a sucção representa, em média, 33% da resistência da amostra. A saturação contribui para a diminuição do valor do ângulo de atrito do solo.

O ângulo de atrito e a coesão foram avaliados no ensaio de cisalhamento direto. O ângulo de atrito é mais alto nas amostras indeformadas, principalmente nos planos perpendiculares, como esperado. A coesão é a governante da diferença da resistência ao cisalhamento entre os planos, sendo bem maior no plano perpendicular do que nos outros planos e se mostrou maior em planos saturados do que em planos na umidade natural, por mais de que as amostras à umidade natural tenham maior resistência do que as amostras saturadas.

No que se referem às amostras compactadas, os valores de ângulo de atrito e coesão não são alterados significativamente nas condições estudadas. Isto se dá à umidade de moldagem, pois teoricamente a umidade ótima se encontra próxima dos 85% do grau de saturação, o que oferece ao solo uma grande proximidade de comportamento à condição saturada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal do Estado de Mato Grosso que disponibilizou seu laboratório de solos e nos forneceu a prensa de cisalhamento direto, sem o qual não seria possível a realização dos ensaios de cisalhamento e, conseqüentemente, do presente artigo. Agradecemos, também, ao Instituto Federal de Educação pela imensa colaboração com este estudo, desde a extração da amostra até a análise dos resultados obtidos.

Como contribuição para futuros trabalhos, sugere-se que as pesquisas do solo da Baixada Cuiabana aprofundem-se nas pesquisas para obtenção de maior conhecimento sobre os valores de sucção destes solos, em um maior desenvolvimento das pesquisas de resistência ao cisalhamento e em melhorias das características dos solos compactados.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM-D 3080 - *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. U.S., 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457 - *Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, RJ, 1986.
- NBR 6459 - *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, RJ, 1984.
- NBR 7180 - *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, RJ, 1988.
- NBR 7181 - *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, RJ, 1984.
- NBR 7182 - *Solo - Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro, RJ, 1986.
- NBR 9820 - *Coleta de Amostras Indeformadas de Solos*. Rio de Janeiro, RJ, 1997.
- BOSZCZOWSKI, R. B. *Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC - Rio, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- DELGADO, A. K. C. *Influência da sucção no comportamento de um perfil de solo tropical compactado*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002.
- FUTAI, M. M. *Comportamento das Fundações em Solos Tropicais em Cuiabá*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, MT, 1995.
- FUTAI, M. M. et al. *Discussão: Investigações de campo e de laboratório sobre o comportamento da argila de Sarapuí*. Solos e Rochas, v. 29, p. 125-126, 2005.
- RIBEIRO JÚNIOR, I. CONCINI, W. *Controle da expansão do solo saprolítico de filito com cal hidratada cálcica para construções populares*. I seminário Mato-grossense de habitação de interesse social. Cuiabá, MT, 2005.
- RIBEIRO, K. F. A. *Influência da expansão do solo na obtenção dos parâmetros geotécnicos obtidos com ensaios de laboratório*. Trabalho de Conclusão do Curso, Departamento da Área de Construção Civil, Instituto Federal de Mato Grosso. Cuiabá, MT, 2009.