



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Adriane Dorninger Feitosa

A influência do Vetiver nos parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito

Ouro Preto

2017

Adriane Dorninger Feitosa

A influência do Vetiver nos parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira
Co-orientador: Thiago Marques Baptista Teixeira

Ouro Preto
2017

F311i

Feitosa, Adriane Dorninger.

A influência do vetiver nos parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito [manuscrito] / Adriane Dorninger Feitosa. - 2017.

43f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

Coorientador: Engenheiro: Thiago Marques Baptista Teixeira.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Solos - Conservação - Vetiver. 2. Coesão. 3. Engenharia civil - Ângulo de atrito. I. Ferreira, Lucas Deleon. II. Teixeira, Thiago Marques Baptista. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624

Adriane Dorninger Feitosa

A influência do Vetiver nos parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito

Monografia de conclusão de curso para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto, apresentada e aprovada em sessão pública em 5 de Abril de 2017, pela banca examinadora constituída pelos membros:



Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira – Orientador – UFOP



Thiago Marques Baptista Teixeira – Co-orientador



Prof. Me. Eleonardo Lucas Pereira – UFOP

RESUMO

O uso da vegetação, especificamente das gramíneas, como alternativa para controle de erosão e prevenção de escorregamentos em taludes tem aumentado muito por ser uma alternativa menos onerosa, além de gerar menos resíduos que as obras tradicionais de engenharia. Dentre as várias espécies de gramíneas usadas atualmente, uma vem se destacando, o Vetiver, que é originária da Ásia e deve seu sucesso à sua grande habilidade de adaptação às mais variadas condições físicas e químicas do ambiente. Diferentemente das gramíneas em geral, que são espécies rasteiras de raízes pouco profundas, o sistema de raízes do Vetiver pode atingir até três metros de profundidade. De acordo com diversas pesquisas as raízes aumentam a resistência ao cisalhamento do solo, contribuindo para a melhoria da sua estabilidade. Com o objetivo de melhor entender esse incremento de resistência, este trabalho analisa os parâmetros coesão e ângulo de atrito, para amostras de solo contendo Vetiver com idade de cinco anos, e amostras do mesmo solo sem raízes, por meio de ensaios de cisalhamento direto. Os resultados dos ensaios foram positivos, mostrando incremento, principalmente, nos valores de coesão das amostras com raízes em relação às amostras sem raízes. Logo, o uso do Vetiver se mostrou eficaz no incremento de resistência do solo.

Palavras chave: Vetiver, coesão, ângulo de atrito

ABSTRACT

The use of vegetation, specifically grasses as an alternative to erosion control and prevention of landslide, has been greatly increased because it is a less expensive alternative, as well as generating less waste than traditional engineering works. Among the various species of grasses currently used, one has come to stand out, Vetiver, which originates in Asia and owes its success to its great ability to adapt to the most varied physical and chemical conditions of the environment. Unlike grasses in general, which are shallow rootstocks, Vetiver's root system can reach up to three meters deep. According to several studies the roots increase the resistance to the shear of the soil, contributing to the improvement of its stability. In order to better understand this increase in resistance, this work analyzes the cohesion and friction angle parameters for Vetiver soil samples at the age of five years, and samples of the same soil without roots, using direct shear tests. The results of the tests were positive, mainly showing increase in the cohesion values of the samples with roots in relation to the samples without roots. Therefore, the use of Vetiver proved to be effective in increasing soil resistance.

Keywords: Vetiver, cohesion, angle of friction

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA.....	6
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO SOLO.....	9
2.1.1. ÂNGULO DE ATRITO.....	9
2.1.2 COESÃO.....	12
2.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	14
2.3 A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA ESTABILIDADE DOS SOLOS	15
2.4 SISTEMA VETIVER.....	18
3 METODOLOGIA.....	27
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	33
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	33
4.2 CISALHAMENTO DIRETO	34
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

Técnicas de bioengenharia estão sendo cada vez mais utilizadas devido à atual preocupação com o meio ambiente e por apresentarem, na maioria das vezes, menor custo em relação as técnicas tradicionais. Em se tratando de estabilização superficial de taludes e contenção de processos erosivos, o uso de gramíneas vem sendo muito utilizado, por trazer benefícios ao solo como: a diminuição do impacto da água das chuvas com a superfície; o aumento da infiltração de água, reduzindo o escoamento superficial; a manutenção da umidade, minimizando as perdas por evaporação, entre outros.

Dentre as técnicas atualmente utilizadas na remediação de solos, destaca-se o Sistema Vetiver (SV), que vem sendo empregado também no controle de efluentes e na reabilitação de áreas contaminadas. A figura 1.1.1 mostra uma fileira de Vetiver plantada em crista de talude.

Figura 1.1.1 – Fileira de Vetiver plantada em crista de talude.



Fonte: <http://deflor.com.br/wp-content/uploads/2012/11/pok3.jpg>

De acordo com Pereira (2006) o vetiver é utilizado na Índia e em grande parte da Ásia há mais de três mil anos na confecção de produtos artesanais, na fabricação de

perfumes, medicamentos, repelente de insetos, entre outros. Ainda segundo o autor, desde 1931 foi observado o desenvolvimento do vetiver em Kuala Lumpur, na Malásia, com o objetivo de contenção de encostas e taludes íngremes, mas o maior avanço do sistema foi na década de 1970, que compreende a fase do desenvolvimento das teorias e práticas modernas para o controle de erosão.

A atual disseminação e propagação do SV bem como as várias pesquisas relacionadas ao vetiver pelo mundo se devem ao seu ótimo desempenho e adaptação às mais diferenciadas situações. Pode ser cultivado em uma ampla variedade de condições climáticas e de solo, e se plantado corretamente pode ser usado em praticamente qualquer lugar que seja de clima tropical, semi-tropical e mediterrâneo. Tem características que em sua totalidade são exclusivas de uma única espécie. Quando o capim vetiver é cultivado de uma forma estreita e autossustentável, tipo barreira (fileira) viva de plantas ele apresenta características especiais que são essenciais para muitas das diferentes aplicações que compõem o SV (TRUONG, VAN, PINNERS, 2008).

Pereira (2006) afirma que o vetiver tem apresentado bons resultados em obras civis, para a proteção de taludes em beiras de estradas, proteção de lagos, em terraços e canais, tanto pela sua eficiência quanto pelo seu baixo custo quando comparado com outras práticas utilizadas em engenharia. Em muitos casos se utiliza essa técnica de forma complementar a outras tecnologias para proteger diversas obras, diminuindo custos com manutenção e aumentando a vida útil de muitas estruturas.

Dentre as pesquisas que vêm sendo realizadas com o capim vetiver, muitas abordam seus aspectos físicos e sua resistência ao cisalhamento, através de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto. A abordagem feita na maioria dessas pesquisas é qualitativa, o que torna as pesquisas de abordagem quantitativa mais relevantes, principalmente pelo fato destas apresentarem resultados que divergem uns dos outros. Tal divergência se justifica por se tratar de um organismo vivo, que depende de condições como tipo de solo, clima da região, quantidade e variabilidade de nutrientes disponíveis para se desenvolver, o que influencia diretamente no resultado dos ensaios citados.

Diante das inúmeras características positivas do SV, faz-se necessário então que novas pesquisas sejam realizadas, para aumentar as referências de dados,

incrementar a literatura sobre o tema e impulsionar o uso do SV no Brasil, que ainda é restrito.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

A finalidade deste trabalho é analisar a influência do Sistema Vetiver, nos parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito. Por meio de ensaios de cisalhamento direto, pretende-se mostrar de forma quantitativa a melhoria causada pela presença de raízes do vetiver nestes parâmetros, que estão diretamente relacionados à estabilidade do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO SOLO

A capacidade de uma massa de solo suportar cargas e conservar sua estabilidade depende da resistência ao cisalhamento do solo. Essa massa de solo se rompe quando esta resistência é excedida, e importantes problemas de engenharia de solos e fundações dependem dessa resistência, como estabilidade de taludes, empuxos de terra sobre paredes de contenção, capacidade de carga de sapatas e estacas, entre outros. (CAPUTO, 1988)

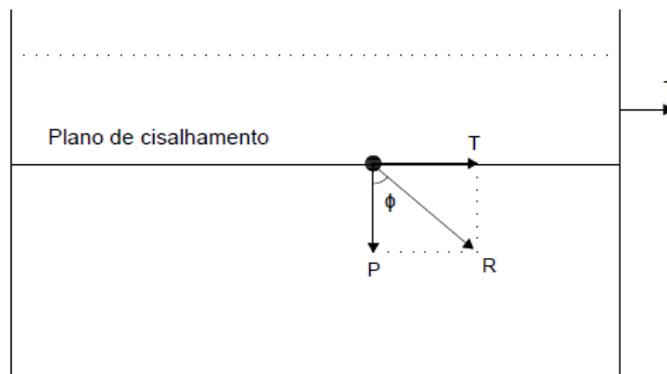
A resistência ao cisalhamento de um solo se compõe, basicamente, de duas componentes, a coesão e o ângulo de atrito. Em geral, o critério de ruptura utilizado nas análises de estabilidade de solos é o de Mohr-Coulomb, que determina essas componentes.

2.1.1. ÂNGULO DE ATRITO

Na Mecânica Clássica o atrito nada mais é do que uma força contrária ao movimento dos corpos. É a força que reage à outra força aplicada em um corpo para movimentá-lo, e o movimento só ocorrerá se essa força superar a força de atrito. Na Mecânica dos Solos o raciocínio é o mesmo.

Fiori e Carmignani (2009) descrevem uma experiência que ilustra perfeitamente o conceito em questão, baseado na figura 2.1.1.

Figura 2.1.1 – Experimento com caixa de madeira, cheia de areia, cortada ao meio.



Fonte: Fiori e Carmignani, 2009.

A figura 2.1.1 retrata uma caixa de madeira previamente cortada, que é cheia com areia. Uma força T (força de tração) tende a deslocar as duas partes da caixa, gerando o plano de cisalhamento também representado na figura.

Sobre um grão de areia posicionado no plano de cisalhamento, atuam a força normal P , devido ao peso da massa de areia sobrejacente a esse grão, e a força T , transferida da borda da caixa e disposta paralelamente ao plano de cisalhamento. Anota-se a razão T/P no início do movimento da caixa. A seguir, acrescenta-se outra camada de areia sobre a anterior e repete-se a experiência, anotando-se novamente a razão T/P no início do movimento. Após algumas repetições da mesma experiência, verifica-se que a razão T/P permanece aproximadamente constante. Essa razão pode ser reescrita de outra forma, onde σ_n e τ representam as componentes normal e cisalhante da tensão, respectivamente, relativamente ao plano de cisalhamento.

$$\frac{T}{P} = \frac{\tau}{\sigma_n} \cong \text{constante}, \quad (2.1.1)$$

e, logo, tendo-se por base a geometria da figura 2.1.1:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \text{tg } \emptyset \quad (2.1.2)$$

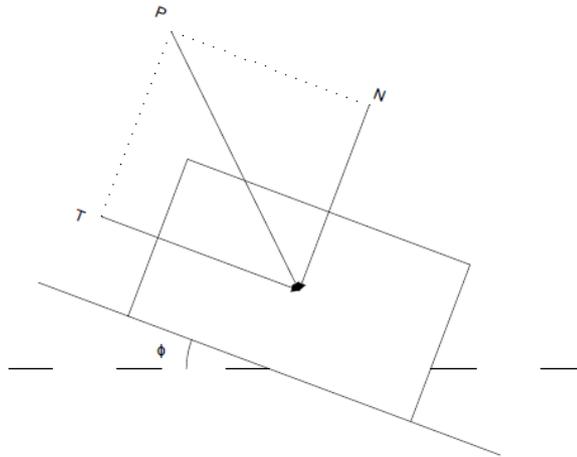
A equação 2.1.2 pode ser reescrita da forma:

$$\tau = \sigma_n \text{tg} \emptyset \quad (2.1.3)$$

Nesse caso, o ângulo \emptyset é conhecido como ângulo de atrito interno e, como o material adotado como exemplo foi a areia, é dito ângulo de atrito interno da areia e vale especificamente para o tipo de areia ensaiada. O ângulo de atrito interno não é constante, variando de material para material.

O movimento pode ocorrer também pela inclinação do plano de contato, que altera as componentes normal e cisalhante ao plano do peso próprio, como mostra a figura a seguir:

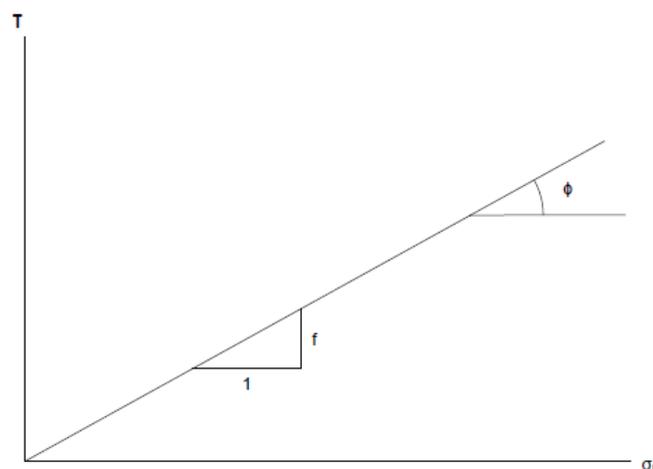
Figura 2.1.2 – Plano de atrito inclinado.



Fonte: Pinto, 2002.

Experiências feitas com corpos sólidos mostram que o coeficiente de atrito (representado, nas equações anteriores, pela tangente do ângulo de atrito) é independente da área de contato e da força (ou componente) normal aplicada. Assim a resistência ao movimento é diretamente proporcional à tensão normal e pode ser representada por uma linha reta, como mostra a figura a seguir (PINTO, 2002):

Figura 2.1.3 - Linha que representa a força de atrito.



Fonte: Pinto, 2002.

A figura 2.1.3 mostra o gráfico da envoltória de ruptura definida pela equação 2.1.3. Se as magnitudes de σ_n e τ forem tais que representem um ponto abaixo da linha da envoltória, a ruptura por cisalhamento não ocorrerá, ao longo do plano. Se as magnitudes de σ_n e τ representarem um ponto sobre a reta (sobre a linha da envoltória), a ruptura por cisalhamento ocorrerá ao longo daquele plano. E caso as magnitudes representem um ponto acima da linha da envoltória, a ruptura por cisalhamento já teria ocorrido (BRAJA, 2007).

2.1.2 COESÃO

A resistência ao cisalhamento dos solos é essencialmente devida ao atrito entre as partículas. Entretanto, a atração química entre estas partículas pode provocar uma resistência independente da tensão normal atuante no plano e que constitui uma coesão real, como se uma cola tivesse sido aplicada entre os corpos (PINTO, 2002).

No experimento da caixa de areia citado anteriormente, tratava-se de um material não coesivo. Agora, considerando um material coesivo, vai-se aumentando a tensão T , aumentando-se conseqüentemente a resistência ao atrito, de forma gradativa. Entretanto, quando a tensão atingir ou mesmo superar o valor máximo da força de atrito, o corpo não se moverá, como no caso anterior, por causa da coesão. Continuando-se a aumentar o valor da tensão, alcança-se um valor em que se dará o movimento, ou seja, o efeito da cola entre o corpo e a superfície foi superado (FIORI E CARMIGNANI, 2009).

Fiori e Carmignani (2009) citam ainda que após ter ocorrido o movimento, o valor da coesão se anula, o que se verifica ao se tentar deslocar novamente o corpo, aplicando-se novamente uma força gradualmente crescente. O corpo agora se deslocará quando a força de tensão superar a resistência ao atrito. É o que acontece quando ocorre pela primeira vez a movimentação ao longo de uma falha, mais difícil no início porque a tensão terá de superar os efeitos somados da coesão e do atrito interno. A renovação do movimento ou reativação da falha, após a perda do efeito da coesão é facilitada, bastando, para isso, superar apenas a resistência ao atrito.

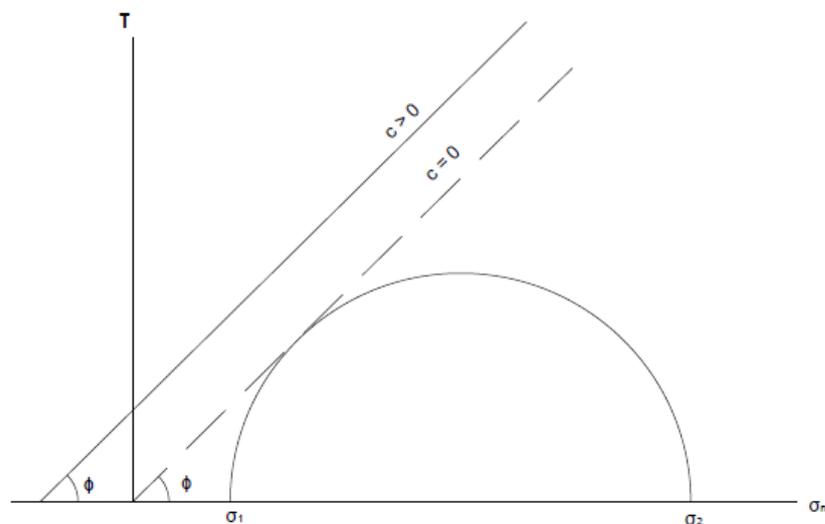
Quando trata-se de materiais coesivos, é acrescentado à equação 2.1.3 o efeito da coesão, o parâmetro c :

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi \quad (2.1.4)$$

Caputo (1988) ressalta a diferença entre a coesão real e a aparente. A primeira é devido às forças eletroquímicas de atração das partículas de argila, e depende de fatores que estão relacionados ao estudo da física dos solos e da química coloidal. A segunda é resultante da pressão capilar da água contida nos solos, e age como se fosse uma pressão externa.

O efeito da coesão pode ser observado através das envoltórias de Mohr apresentadas na figura a seguir. A diferença entre as curvas está no valor da coesão (c), sendo que, em ambas o valor do ângulo de atrito é o mesmo. Verifica-se que sendo $c > 0$ não haverá ruptura do material, pois nessas condições o círculo não tangencia a envoltória de Mohr.

Figura 2.1.4 – Efeito da coesão na ruptura em um solo coesivo ou rocha.



Fonte: Fiori e Carmignani, 2009.

Há vários métodos de laboratório atualmente para se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento para vários corpos de prova no laboratório. Dentre eles, os mais utilizados são o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio triaxial, dos quais somente o primeiro será detalhado, por se tratar do ensaio em questão neste trabalho (BRAJA, 2007).

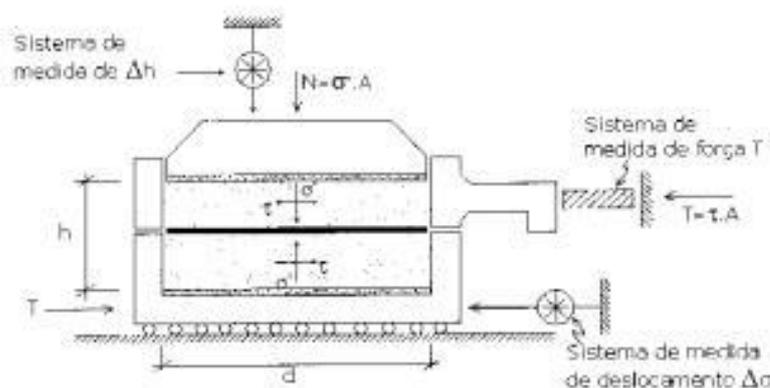
2.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Em toda obra de engenharia que envolve conhecimentos geotécnicos há necessidade de investigação da resistência ao cisalhamento do solo em questão. É a partir dessa resistência que são dimensionadas as fundações e estruturas de contenção, por exemplo. Faz-se necessário então a realização de ensaios para se determinar os parâmetros de resistência do solo, sendo o ensaio de cisalhamento direto o mais usual.

Dentre os vários métodos laboratoriais para se determinar os parâmetros de resistência do solo, o ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo, simples e barato. Dependendo do equipamento, o ensaio pode ser de tensão controlada ou de deformação controlada.

O equipamento de ensaio (figura 2.2.1) consiste em uma caixa metálica de seção transversal quadrada ou circular, dividida horizontalmente em duas metades. São colocadas placas porosas abaixo e acima do corpo-de-prova, caso esteja parcialmente ou totalmente saturado. No caso de corpo-de-prova seco, pode ser usado placas de metal, já que não há água para ser dissipada (CRAIG, 2007).

Figura 2.2.1 – Esquema do Ensaio de Cisalhamento Direto.



Fonte: Albuquerque, 2003.

A amostra é colocada na caixa, onde se aplica a força normal N , aumentando em seguida a força tangencial T , provocando o deslocamento de uma das partes da caixa em relação à outra, até a ruptura. As tensões normal e cisalhante no plano de ruptura são, respectivamente, $\sigma = N/A$ e $\tau = T/A$, onde A é a área da seção transversal da amostra (ORTIGÃO, 2007).

Normalmente também é medida a modificação da espessura do corpo de prova (Δh). Se a espessura inicial do corpo de prova for h_0 e o deslocamento de cisalhamento for Δl , então a distorção (deformação angular γ) pode ser representada por $\Delta l/h_0$ e a deformação volumétrica (ϵ_v) por $\Delta h/h_0$. Vários corpos de prova de solo são ensaiados, cada um deles sob uma força normal diferente, e os valores das tensões de cisalhamento na ruptura são plotados em relação à tensão normal de cada ensaio. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento são obtidos então a partir da linha que melhor se ajusta aos pontos plotados (CRAIG, 2007).

O ensaio de cisalhamento direto apresenta algumas desvantagens, como a impossibilidade de controlar as condições de drenagem, fornecendo valores relativos apenas às tensões totais. Permite o estudo da resistência em um único plano de ruptura, que é imposto, sendo que a tensão de cisalhamento no plano de ruptura não é uniforme, pois rupturas internas em outras direções podem ocorrer anteriormente. Mas considerando sua simplicidade, o ensaio em questão mostra-se muito útil no estudo da resistência.

2.3 A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA ESTABILIDADE DOS SOLOS

A importância da vegetação na proteção do solo contra eventuais movimentos de massa e erosão é um assunto muito discutido, devido a intensificação da ação antrópica e o crescimento das áreas urbanas. Tais fenômenos estão, geralmente, relacionados à retirada da cobertura vegetal, aumentando assim as áreas de risco existentes, fazendo-se necessárias cada vez mais obras de engenharia no sentido de estabilizar tais áreas.

Dentre as técnicas de bioengenharia utilizadas atualmente, o uso de gramíneas na cobertura vegetal para estabilização de massas de solos vem sendo muito utilizadas. Os aspectos de maior relevância na escolha do tipo de vegetação são: peso da cobertura vegetal; força de arrasto do vento atuando nas copas das árvores; e a resistência do sistema solo-raiz. Em se tratando de gramíneas, os dois primeiros aspectos, que normalmente são considerados efeitos negativos das plantas, podem ser desconsiderados.

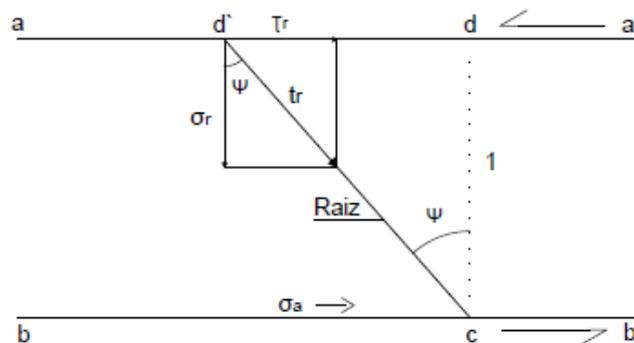
De acordo com Coelho (2006), o aumento da resistência ao cisalhamento do solo está vinculada diretamente à transferência direta das tensões de cisalhamento

para a resistência das raízes à tensão. Essa transferência ocasiona incrementos consideráveis na resistência ao cisalhamento do solo, com conseqüente redução da erodibilidade, e no aumento da estabilidade do solo. Esse efeito é denominado reforçamento radicular e pode variar em decorrência de fatores como:

- Valores de resistência à tensão das raízes;
- Propriedades da interface entre as raízes e o solo;
- Concentração, características de ramificação e distribuição das raízes no solo – também denominada arquitetura radicular;
- Espaçamento, diâmetro e massa de solo explorada pelas raízes;
- Espessura e declividade do perfil do solo do talude;
- Parâmetros geotécnicos relativos à resistência ao cisalhamento do solo.

Fiori e Carmignani (2009) apresentam um modelo de um sistema solo-raiz, sujeito a cisalhamento simples, como mostra a figura 2.3.1:

Figura 2.3.1 – Modelo de cisalhamento simples em um sistema solo-raiz.



Fonte: Fiori e Carmignani, 2009.

Em que:

$$\sigma_r = t_r \cos \psi \quad (2.3.1)$$

e

$$\tau_r = t_r \sin \psi \quad (2.3.2)$$

A zona de cisalhamento está situada entre as retas (aa) e (bb), sendo ψ o cisalhamento angular. A raiz, inicialmente perpendicular à zona, na posição (cd), é

deslocada a uma nova posição (cd'). Seja a resistência à tração média das raízes por unidade de área de solo, t_r , determinada pela multiplicação da resistência à tração média da raiz, T_r , pela fração da área da seção transversal do solo ocupada pelas raízes (A_r/A). A resistência à tração t_r da raiz pode ser decomposta nas componentes paralela (τ_r) e perpendicular (σ_r) à zona de cisalhamento:

$$t_r = T_r \frac{A_r}{A} \quad (2.3.3)$$

A fração da área da seção transversal do solo ocupada pelas raízes, de acordo com Pugliesi (1998, *apud* Fiori e Carmignani, 2009), pode ser calculada por meio da classificação de diâmetros de raízes em uma dada área de solos pela relação:

$$\frac{A_r}{A} = \frac{\sum n_i a_i}{A} \quad (2.3.4)$$

Em que n_i representa o número de raízes de diâmetro i e a_i a área da seção transversal da raiz de diâmetro i .

Logo, a contribuição das raízes para o aumento da resistência ao cisalhamento S_r é dada por:

$$S_r = \tau_r + \sigma_a \quad (2.3.5)$$

O principal efeito das fibras do sistema radicular da vegetação no reforço de solos está relacionado ao incremento da coesão aparente. A coesão efetuada pelas fibras radiculares pode fazer uma diferença significativa na resistência a deslizamentos superficiais ou em movimentações por cisalhamento na maioria de solos arenosos com pouca ou nenhuma coesão intrínseca. Em testes executados em condições de campo e de laboratório foi verificado o aumento da resistência ao cisalhamento por unidade de concentração de fibra radicular da ordem de 7,4 a 8,7 psi / lb de raízes / cf em diferentes espécies de plantas. Além disso, na análise da estabilidade de taludes, foi utilizada a coesão radicular como função da concentração de raízes no solo com a profundidade, verificando que uma pequena variação na coesão radicular pode influenciar substancialmente o fator (coeficiente)

de segurança dos taludes. Essa influência foi consideravelmente verificada nas menores profundidades de solo. (GRAY e SOTIR, 1997, *apud* BARBOSA, 2012).

As gramíneas possuem sistema radicular fasciculado, ou seja, com a raiz primária não desenvolvida, enquanto as raízes secundárias são ramificadas e numerosas, geralmente ocorrendo a menos de 1 m de profundidade. O Vetiver, entretanto, foge à regra, atingindo até 3 m de profundidade (figura 2.3.2). Suas raízes apresentam sistema radicular agregante, formando um grampeamento natural estabilizante de encostas e taludes (PEREIRA, 2006).

Figura 2.3.2 – Raiz do capim Vetiver.



Fonte:<http://sistemavetiver.blogspot.com.br/2016/04/uso-do-capim-vetiver-na-descompactacao.html>)

2.4 SISTEMA VETIVER

O Sistema Vetiver (SV), que é baseado na aplicação do capim vetiver (*Vetiveria Zizanioides* L Nash, agora reclassificado como *Chrysopogon Zizanioides* Roberty L), foi desenvolvido com o apoio do Banco Mundial para a conservação do solo e da água na Índia em meados de 1980. (TRUONG, VAN, PINNERS, 2008).

De acordo com Pereira (2006), os pioneiros que impulsionaram essa tecnologia foram os pesquisadores John Greenfield da Nova Zelândia e o norte-americano Richard Grimshaw, que receberam grande apoio do Banco Mundial. Posteriormente foram-se descobrindo diversas potencialidades do vetiver na biorremediação, com destaque para o australiano Paul Truong que trouxe muitas

contribuições importantes, enfatizando as ótimas características dessa planta na criação de barreiras vivas e outros usos na conservação dos solos.

Pereira (2006) destaca ainda que o vetiver foi introduzido na Venezuela, possivelmente, há mais de 100 anos, mas há 25 anos que se vem estudando sobre suas propriedades antierosivas, na Faculdade de Agronomia da Universidade Central da Venezuela. E graças ao apoio da Rede Mundial do vetiver, criada por iniciativa de R. G. Grimshaw, se desenvolveu desde 1996 um programa de divulgação na Venezuela. Posteriormente apoiou-se a criação da Rede Latino-americana do Vetiver, estabelecida na Costa Rica, a cargo de James Smyle e Joan Miller, atualmente fixada na Venezuela, com sede na *Sociedad Conservacionista Aragua*, situada em Limón, Maracay.

Em agosto de 1996, a tecnologia vetiver chegou ao Brasil por intermédio dos CIERs - Centros Integrados de Educação Rural, com a implantação de pequenos viveiros para a multiplicação das plantas no Estado do Espírito Santo. Em 1999, na região de Camamu, Bahia, foram conseguidas as primeiras mudas do vetiver, assim como em outros Estados do Brasil. Para melhor informar sobre as vantagens e utilizações desta técnica alternativa, com apoio da Rede Mundial e Rede Latino-Americano do Capim Vetiver, foi publicada a cartilha: "Capim Vetiver - A Barreira Vegetal Contra a Erosão: perguntas & respostas e próximos passos". Porém, o uso do capim vetiver no Brasil para controle de erosão, estabilidade de encostas e recuperação de áreas degradadas ainda é muito restrito em razão da deficiência de conhecimento das técnicas de utilização (LOPES 2005 *apud* BARBOSA, 2012).

O Vetiver foi testado por 5 anos, sob a coordenação de pesquisadores do laboratório *Engineering Research Laboratories* (USACERL), que incorporou o Vetiver em vários projetos experimentais para avaliar a sua performance e eficácia como ferramenta biotecnológica na estabilização e preservação de solos com estruturas e texturas distintas. O relatório de avaliação concluiu que o Vetiver foi a espécie que apresentou os melhores resultados de fitorremediação. A Agência para o Desenvolvimento Internacional dos Estados Unidos (U.S. *Agency For International Development* - USAID); o Conselho de Pesquisa dos Estados Unidos (*The National Research Council* – NRC), e a Academia de Ciência Naturais (*National Academy of Sciences*) pesquisaram o Sistema Vetiver, sendo aprovada, por unanimidade, como tecnologia barata, eficaz e segura para o efetivo controle de erosão e conservação da água no solo. Dada suas excelentes características, no Brasil o Vetiver é indicado

pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT) em sua “Norma 074/2006 – ES” para ser utilizado no tratamento ambiental de taludes e encostas. Da mesma forma a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) recomenda o uso do Vetiver como uma técnica de baixo custo para ser utilizado no controle de voçorocas em áreas rurais. (<http://sistemavetiver.blogspot.com.br/p/o-capim-vetiver.html>, acessado em 27/11/2016)

O capim Vetiver pertence à família das gramíneas, natural da Índia. É uma planta perene que, quando adulta, mede entre 1,5 e 2,0 metros de altura, possuindo colmos eretos e resistentes. Uma de suas características mais marcantes é o fato de não produzir rizomas ou estolões e, apesar de produzir inflorescências, suas sementes são estéreis, o que a torna uma planta não invasora, característica que possibilita a sua utilização em diferentes biomas sem a preocupação de se tornar praga. Outra característica relevante para o uso de capim Vetiver em cordões de vegetação permanente são suas raízes, que podem atingir até 5 metros de profundidade, dependendo do substrato em que for plantado (CHAVES, ANDRADE, 2013).

A atual disseminação e propagação do SV bem como as várias pesquisas relacionadas ao Vetiver pelo mundo se devem ao seu ótimo desempenho e adaptação às mais diferenciadas situações, como aponta (TRUONG, VAN, PINNERS, 2008):

- É resistente a pragas, doenças e incêndios;
- É tolerante a extremas variações climáticas como secas prolongadas, inundações, submersões e temperaturas extremas de -15 °C a +55 °C;
- Volta a crescer muito rapidamente depois de ter sido afetado por secas, geadas, salinidade e condições adversas depois que o tempo melhore ou potenciadores de solo são adicionados;
- É tolerante à ampla faixa de pH no solo de 3,3 a 12,5 sem alteração do mesmo;
- Apresenta alto nível de tolerância a herbicidas e pesticidas;
- É altamente eficiente absorvendo nutrientes dissolvidos, tal como nitrogênio (N) e fósforo (P), metais pesados e água poluída;

- É altamente tolerante ao crescimento médio elevado de acidez, alcalinidade, sodicidade e magnésio;
- É altamente tolerante a alumínio (Al), manganês (Mn) e metais pesados como arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), selênio (Se) e zinco (Zn) nos solos.

O Sistema Vetiver consiste em uma série de técnicas de bioengenharia, e tem como base o capim Vetiver. Sua aplicação na área de controle de erosão e conservação do solo baseia-se na formação de barreiras vivas, em que as mudas são dispostas enfileiradas, formando terraços naturais.

De acordo com Pereira (2006), as barreiras formadas pelo SV são construídas em nível, no sentido transversal à declividade dos taludes e encostas, com o objetivo de reter sedimentos e reduzir a energia potencial da água pluvial. A distância entre as barreiras sucessivas depende da coesão do solo, da declividade e da segurança requerida, mas em geral, costumam ser distanciadas de 1 m de desnível, conforme ilustra a figura 2.4.1.

Figura 2.4.1 – Terraço de base estreita plantado com capim Vetiver



Fonte: Chaves e Andrade, 2013.

Os métodos mais simples de propagação de mudas do vetiver consistem na separação de brotos da touceira e no seccionamento do colmo, como mostra a figura 2.4.2.

Figura 2.4.2 – Métodos de propagação de mudas de vetiver.



Fonte: Chaves e Andrade, 2013.

O primeiro método de propagação de mudas, ilustrado na figura 2.4.2, produz mudas com raízes nuas através da separação dos brotos maduros, deixando cada muda com dois ou três brotos e parte da coroa, sendo o método mais utilizado. A segunda retira as folhas que recobrem os colmos, que são então cortados, deixando de 1 a 3 cm de entrenó para cima e para baixo do nó.

Para a formação das barreiras deve ser realizado o plantio do capim Vetiver preferencialmente no início da estação chuvosa, por meio de mudas saudáveis, produzidas em sacolas espaçadas de 15 a 20 cm em linha. O plantio deve ser realizado em sulcos, ou em covas, adubados de acordo com as necessidades identificadas na análise do solo, e as barreiras devem ser instaladas seguindo as curvas de nível do terreno, dependendo da situação, como áreas com voçorocas onde se deseja desviar o escoamento superficial a montante. Estas barreiras podem ser implantadas com um pequeno desnível (3% a 5%), direcionando as águas do escoamento superficial para bacias de captação e/ou para locais de drenagem natural. Quanto mais inclinada ou mais degradada for a área, mais cordões com capim Vetiver deverão ser instalados (ANDRADE, CHAVEZ, 2014).

Pereira (2006), aponta algumas das vantagens das barreiras vivas de Vetiver:

- O vetiver apresenta uma característica fantástica para garantir o sucesso e a eficiência da barreira viva, pois apresenta biotactismo positivo, ou seja, é uma

planta que cresce e se desenvolve em direção a outra, acelerando a formação, o desenvolvimento e a densidade da barreira vegetal;

- A barreira viva de vetiver é de baixo custo, de rápida e fácil implementação, de baixa manutenção e de grande eficiência;
- A barreira viva de vetiver forma uma cerca viva muito densa e com grande capacidade de retenção de até 80 cm de lamina d'água em suas hastes de até 2 m de altura;
- A barreira de vetiver emite grande volume de raízes quando sua base é recoberta por sedimentos, portanto, quanto maior for a capa de sedimentos retidos, maior será a densidade de raízes, tornando o sistema mais eficiente;
- As raízes da barreira de vetiver se adaptam a todos os tipos de terrenos, penetrando em coberturas rochosas e apresentando grande resistência. Podem penetrar no solo com grande profundidade, formando uma malha de solo estruturado natural com alta resistência (raízes com resistência à tração equivalente a 1/6 da resistência do aço doce);
- As barreiras de vetiver são permeáveis, o que reduz a velocidade do escoamento, filtra e regula a passagem da água, evitando o carreamento de sedimentos.

A Verdetec é uma empresa especializada na recuperação de áreas degradadas que oferece soluções ambientais por meio de técnicas de bioengenharia, incluindo a utilização do Sistema Vetiver. A empresa realizou em junho de 2012 a recuperação e estabilização da encosta na Rua Câmara Junior, no loteamento Jardim Alexander, no município de Rio do Sul – SC. A encosta em questão possui uma área total de 1500m², e sofreu deslizamento após forte evento de chuva, levando à interdição de uma residência na base da encosta pela Defesa Civil do município. A área sofreu retaludamento e a encosta foi cortada em bancadas. O projeto visou a recuperação da área, contemplando a revegetação, drenagem, controle da erosão e grampeamento verde do solo. A obra se deu com o acerto superficial do terreno manualmente, construção de canaletas de drenagem, hidrossemeadura de plantas rasteiras, aplicação de retentores de sedimento, instalação de manta vegetal e plantio de mudas de capim-vetiver, como mostram as figuras abaixo: (<http://sistemavetiver.blogspot.com.br/2012/08/sistema-vetiver-utilizado-na.html>, acessada em 27/11/2016)

Figura 2.4.2 - Área total do projeto, inicialmente sem estabilização. Com presença de alguns pontos de deslizamentos e sulcos produzidos pelo trabalho de processos erosivos das águas de escoamento.



Fonte: <http://sistemavetiver.blogspot.com.br/2012/08/sistema-vetiver-utilizado-na.html>

Figura 2.4.3 - Retificação do terreno manualmente, abertura de valas para colocação dos retentores de sedimentos e logo após a aplicação da hidrossemeadura (espécies simbióticas)



Fonte: <http://sistemavetiver.blogspot.com.br/2012/08/sistema-vetiver-utilizado-na.html>

Figura 2.4.4 - Na sequência da Hidrossemeadura, aplicou-se a manta vegetal.



Fonte: <http://sistemavetiver.blogspot.com.br/2012/08/sistema-vetiver-utilizado-na.html>

Figura 2.4.5 - Capim Vetiver plantado em linhas sobre a Manta Vegetal.



Fonte: <http://sistemavetiver.blogspot.com.br/2012/08/sistema-vetiver-utilizado-na.html>

Figura 2.4.6 - Um mês após o término do projeto, nota-se a o início do desenvolvimento do Capim Vetiver e das demais gramíneas, bem como a estabilização da encosta.



Fonte: <http://sistemavetiver.blogspot.com.br/2012/08/sistema-vetiver-utilizado-na.html>

3 METODOLOGIA

Para a realização do presente trabalho, foram coletadas amostras de solo na Fazenda Guaraná, uma das unidades da DEFLOR Bioengenharia, situada no município de Santana dos Montes, Minas Gerais. A figura 3.1 mostra um talude contendo mudas do Vetiver da referida fazenda.

Figura 3.1 – Talude contendo Vetiver da Fazenda Guaraná.



Santana dos Montes está localizada na região central de Minas Gerais a uma distância de 126 km da capital do Estado, Belo Horizonte. Possui uma temperatura média anual de 19,4 °C e um índice pluviométrico médio anual de 1474, 9 mm. O clima quente favorece o estabelecimento das mudas do vetiver. (BARBOSA, 2012)

Foram coletadas amostras indeformadas de solo sem vegetação e amostras contendo capim vetiver com idade de cinco anos, como mostra a figura 3.2, em quatro profundidades diferentes partindo da superfície: 30cm; 30-60cm; 60- 90cm; e 90-120 cm. Todas de acordo com a NBR 9.604/86.

As amostras foram coletadas no mês de agosto de 2016, e permaneceram em câmara úmida por duas semanas, até que os ensaios se iniciassem.

Figura 3.2 – Amostra de solo contendo raízes de Vetiver.

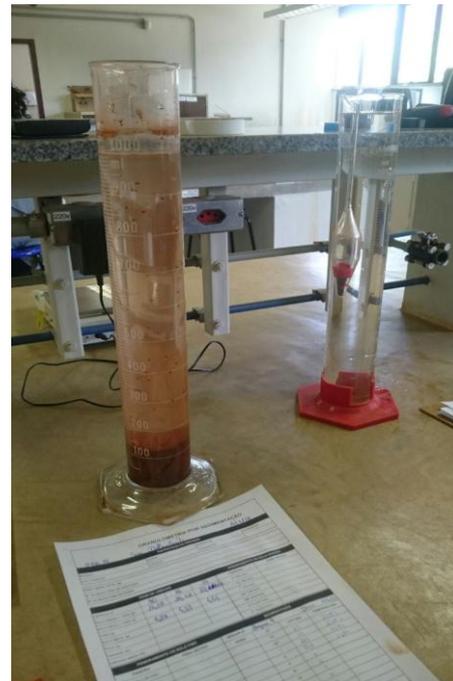


Para a caracterização física do material, foram realizados os seguintes ensaios:

- Caracterização Granulométrica do solo, NBR 7181/2016;
- Determinação do Limite de Liquidez, NBR 6459/2016;
- Determinação do Limite de Plasticidade, NBR 7180/2016;
- Análise de umidade do solo, NBR 6457/2016;

A Caracterização Granulométrica do solo determina a percentagem em peso de cada fração de solo em relação ao tamanho das partículas, considerando-se a massa total realizada no ensaio. Os resultados são expressos por um gráfico, que representa a curva granulométrica. Na abcissa é representado o diâmetro das partículas (em mm), em escala logarítmica, e na ordenada são representadas as percentagens da amostra retidas em cada peneira. A análise granulométrica deste trabalho foi realizada por peneiramento e sedimentação. A figura 3.3 apresenta a aparelhagem necessária para a execução do ensaio.

Figura 3.3 – Aparelhagem utilizada na Caracterização Granulométrica. (Da esquerda para a direita no sentido horário: estufa, balança, agitador, proveta.)



O Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade de um solo estão relacionados com a umidade do solo. Em geral, dependendo da quantidade de água em seu interior, o solo pode se apresentar em um dentre os estados líquido, plástico, semi-sólido e sólido. O limite superior e o limite inferior do intervalo de valores de teor de umidade no qual o solo exibe comportamento plástico são definidos como Limite de

Liquidez e Limite de Plasticidade. O intervalo de valores dos teores de umidade é definido como Índice de Plasticidade (CRAIG, 2007). A figura 3.4 mostra a aparelhagem para estes ensaios.

Figura 3.4 – Aparelhagem para determinação do Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez. (Aparelho de Casa Grande)



A Massa Específica dos Grãos é definida pela razão entre a quantidade de massa e o volume de uma amostra de determinado solo, sendo essa uma relação constante. O ensaio para a determinação da massa específica real dos grãos foi realizado pelo método do picnômetro, de acordo com a figura 3.5.

Figura 3.5 – Aparelhagem para determinação da Massa específica dos grãos. (Bomba de vácuo com registro e picnômetros)



Para a determinação dos parâmetros de resistência do material, coesão e ângulo de atrito, foi realizado o ensaio de Cisalhamento Direto, seguindo a norma ASTM D3080-04 (*Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*). Tais parâmetros foram determinados pelo critério de Mohr – Coulomb, considerando uma envoltória de ruptura linear.

Figura 3.6 – Aparelho de Ensaio de Cisalhamento Direto



Dentre as etapas do ensaio descrito por norma, a colocação do corpo de prova na caixa de cisalhamento teve um cuidado especial devido a presença de raízes. Para uma melhor simulação das condições reais de campo, as raízes não foram cortadas rente à altura da caixa de cisalhamento, conforme ilustra a figura 3.7,

aumentando, desta forma, o atrito nas extremidades do corpo de prova, dificultando ainda mais o deslizamento da massa de solo durante o ensaio. As raízes de Vetiver estavam dispostas perpendicularmente às pedras porosas, devido ao seu comportamento gravitrópico, e não foram medidas possíveis inclinações.

Figura 3.7 – Caixa de cisalhamento direto com corpo de prova contendo Vetiver.



Foram adotados ensaios de cisalhamento direto sob velocidade controlada, de 0,4mm/s, por ser essa uma velocidade baixa. Não foram realizados ensaios com corpos de prova inundados. A montagem da caixa de cisalhamento foi realizada com as pedras porosas, como descreve a norma, para evitar a perda de solo no decorrer do ensaio e evitar também que as raízes saíssem pelos orifícios das placas, fato que aconteceria caso fossem utilizadas placas serrilhadas.

As grandezas medidas no ensaio são as forças horizontais (cujos valores, divididos pela respectiva área de interface, correspondem às tensões cisalhantes mobilizadas), os deslocamentos horizontais e verticais, e as cargas normais aplicadas. Os valores de tensão aplicadas foram de 25, 50, 100 e 200 KPa.

Todos os ensaios descritos foram realizados nos laboratórios de geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, no próximo capítulo serão apresentados e analisados os resultados desses ensaios

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

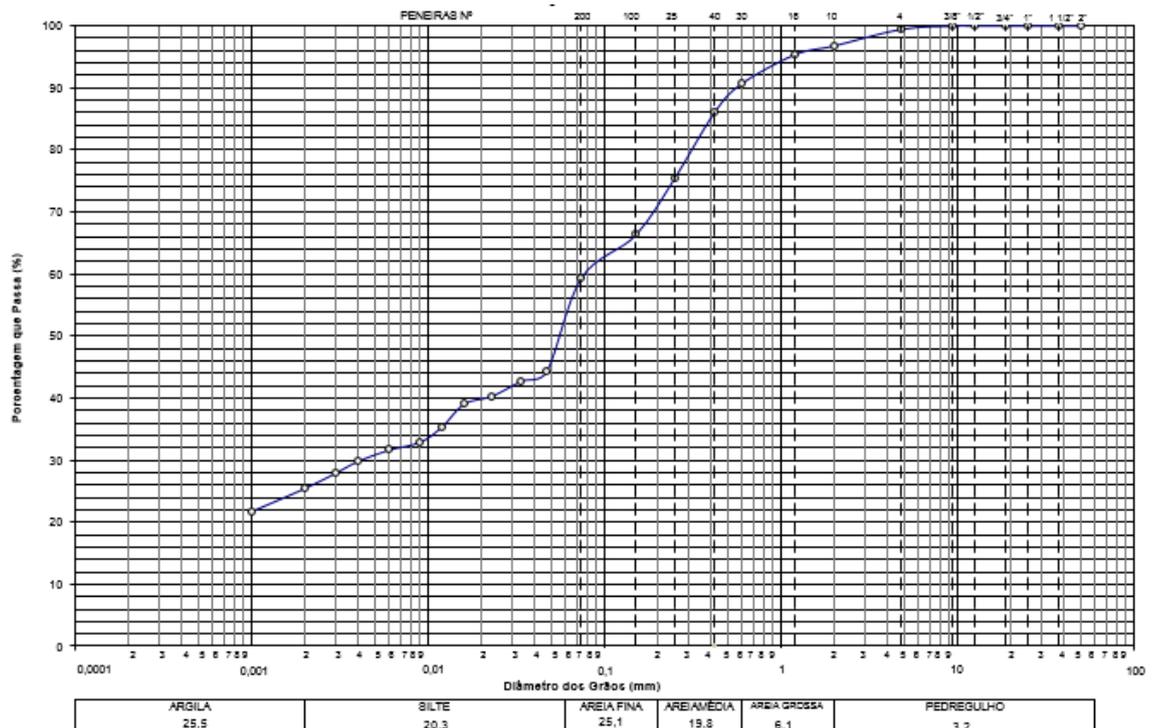
A análise granulométrica está representada na tabela 4.1.1, em função da profundidade da amostra coletada que serviu como referência de nomenclatura destas.

Tabela 4.1.1 – Análise granulométrica.

AMOSTRA	ARGILA (%)	SILTE (%)	AREIA FINA (%)	AREIA MÉDIA (%)	AREIA GROSSA (%)	PEDREGULHO (%)
0-30	25,5	20,3	25,1	19,8	6,1	3,2
30-60	51	22,5	8,5	13,9	4	0,1
60-90	34,3	26,2	17,8	18	3,7	0
90-120	48,1	30,9	4,8	9,6	6,6	0

Em todas as amostras observa-se que a maior fração de solo corresponde à argila, e à medida que a profundidade das amostras aumenta, ocorre a elevação da fração de silte, variando a fração de areia. Logo, o solo em questão é uma argila silto-arenosa. Foi escolhida a amostra de profundidade 30-60 para representar a curva granulométrica, como mostra a figura 4.1.1.

Figura 4.1.1 – Curva granulométrica da amostra 30-60.



Os índices de consistência obtidos das amostras analisadas, são mostrados na tabela 4.1.2, apresentaram valores de IP no intervalo entre 10 e 20. De acordo com Burmister (1949, *apud* Craig, 2007), que classificou o índice de plasticidade de forma qualitativa, para índices de plasticidade entre o intervalo citado, o solo em questão apresenta plasticidade média.

Tabela 4.1.2 – Parâmetros obtidos através dos ensaios de caracterização física.

AMOSTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ_s (kN/m ³)	w (%)
0-30	46,1	30,8	15,3	25,72	20,0
30-60	49,2	34,8	14,4	26,43	23,2
60-90	51,7	36,0	15,7	27,07	23,6
90-120	49,2	37,5	11,7	27,34	24,1

Legenda:

LL= Limite de Liquidez

LP= Limite de Plasticidade

IP= Índice de Plasticidade

γ_s = Peso Específico dos sólidos

w= Teor de umidade natural

4.2 CISALHAMENTO DIRETO

A tabela 4.2.1 apresenta os valores obtidos de coesão e ângulo de atrito, para cada amostra. Nela são apresentados os resultados obtidos com amostras que apresentavam raízes em comparação a uma amostra que não apresentava raízes. Os parâmetros de resistência são apresentados para valores de pico e residual.

Tabela 4.2.1 – Parâmetros obtidos através dos Ensaios de Cisalhamento Direto.

AMOSTRA	COESÃO (kPa)		ÂNGULO DE ATRITO	
	PICO	RESIDUAL	PICO	RESIDUAL
SEM RAIZ	15,32	11,36	36,2°	36,9°
0-30	61,93	61,25	34,8°	34,9°
30-60	56,25	53,15	31,5°	32,3°
60-90	42,58	37,56	33,3°	34,3°
90-120	19,78	15,55	33,3°	34,1°

Observa-se que, as amostras contendo raízes do Vetiver apresentaram valores de coesão maiores do que a amostra de solo sem raízes, evidenciando que o Vetiver, de fato, tem influência sobre os parâmetros de resistência do solo. Verifica-se que a coesão apresentada pela amostra 0-30 foi aproximadamente 4 vezes maior do que o parâmetro obtido para o solo sem raízes.

Como já foi dito neste trabalho, o ângulo de atrito é característico de cada material, e como pode-se observar na tabela 4.2.1 há pequena variação de valores entre as diferentes amostras. E analisando o valor numérico que esse fator representa na fórmula 2.1.4, trata-se de valores muito pequenos, já que o valor da tangente do ângulo é muito pequeno.

A amostra 0-30 foi a que apresentou maior valor de coesão, e é a de maior proximidade com a superfície. Isso se deve ao fato de que quanto mais próximo à superfície, maior a quantidade de raízes secundárias, fato que justifica a redução da coesão em função do aumento da profundidade conforme ilustram os valores da tabela 4.2.1. Por esse motivo, foi escolhido a amostra 0-30 para a comparação dos resultados com a amostra sem raízes de Vetiver.

As figuras 4.2.1 e 4.2.2 apresentam o gráfico Tensão Cisalhante x Deformação Horizontal para as amostras sem raízes de Vetiver e de profundidade 0-30, respectivamente. Neles são apresentados os valores de deformação horizontal para as quatro tensões utilizadas nos ensaios, 25kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200kPa.

As curvas de representadas nas figuras 4.2.1 e 4.2.2 apresentam aspecto semelhante, como uma curva crescente. Este formato caracteriza uma ruptura plástica da amostra, onde o esforço máximo é mantido com a continuidade da deformação. Apenas as curvas de tensão 25 e 50 kPa apresentam uma tensão de pico considerável, com o aumento da tensão de confinamento essa tendência desaparece. Isso significa que após atingir a tensão de ruptura a resistência da amostra cai gradualmente à medida que se aumenta a deformação.

Por se tratar de um solo argiloso, ambas as amostras não apresentam no gráfico uma tensão de pico ou uma tensão residual definida. Isso se deve à coesão aparente desse tipo de solo.

Figura 4.2.1 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal da amostra sem raízes de Vetiver.

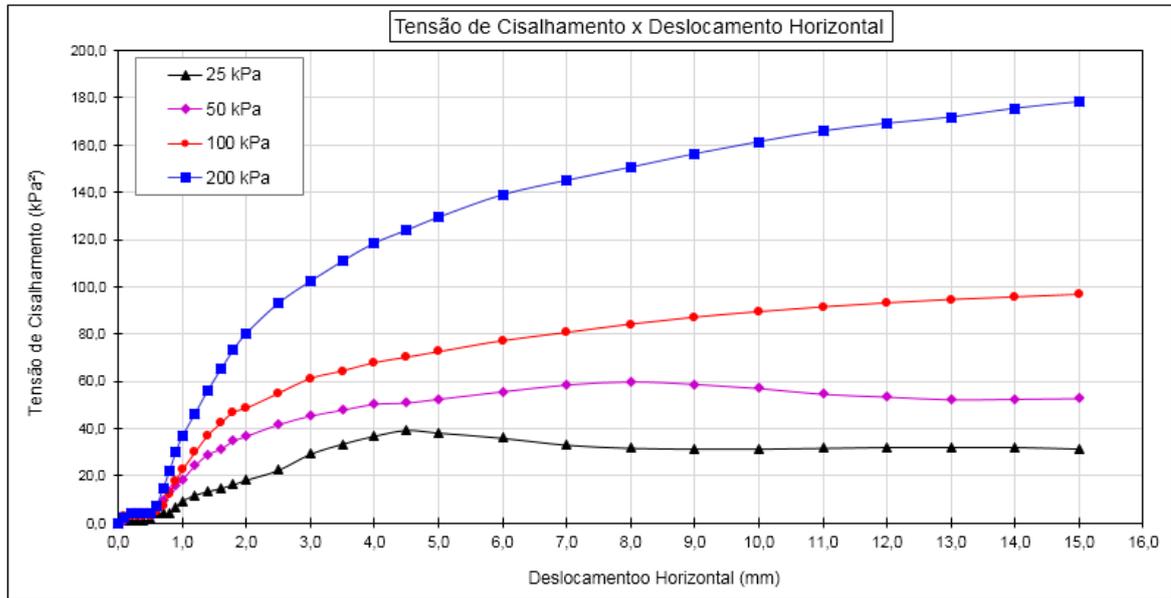
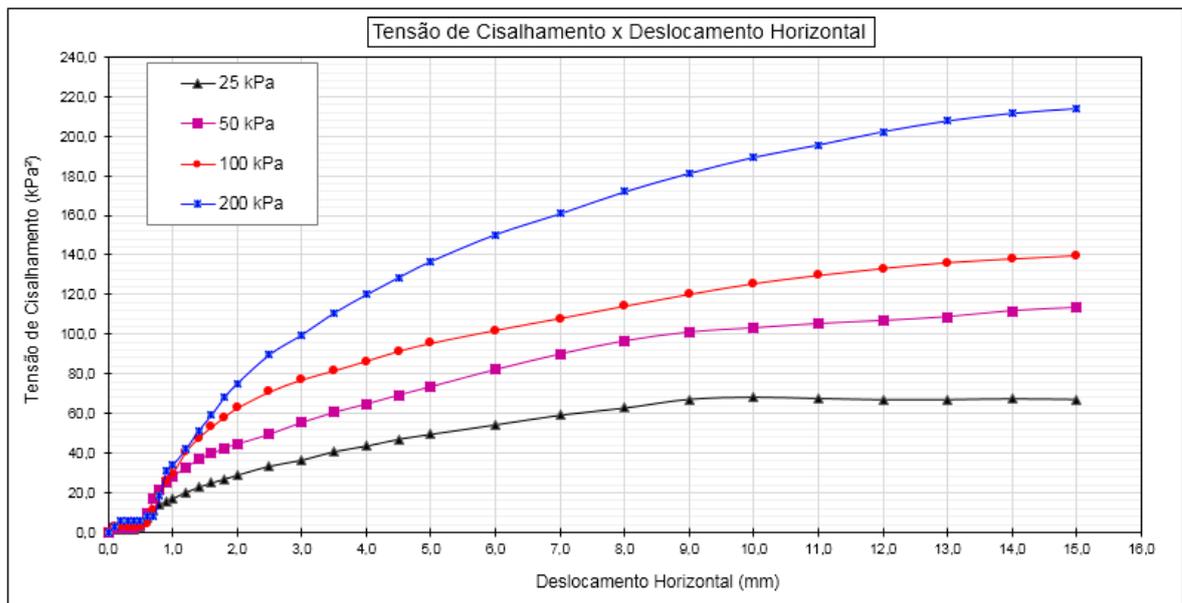


Figura 4.2.2 – Gráfico Tensão cisalhante x Deslocamento horizontal da amostra 0-30.

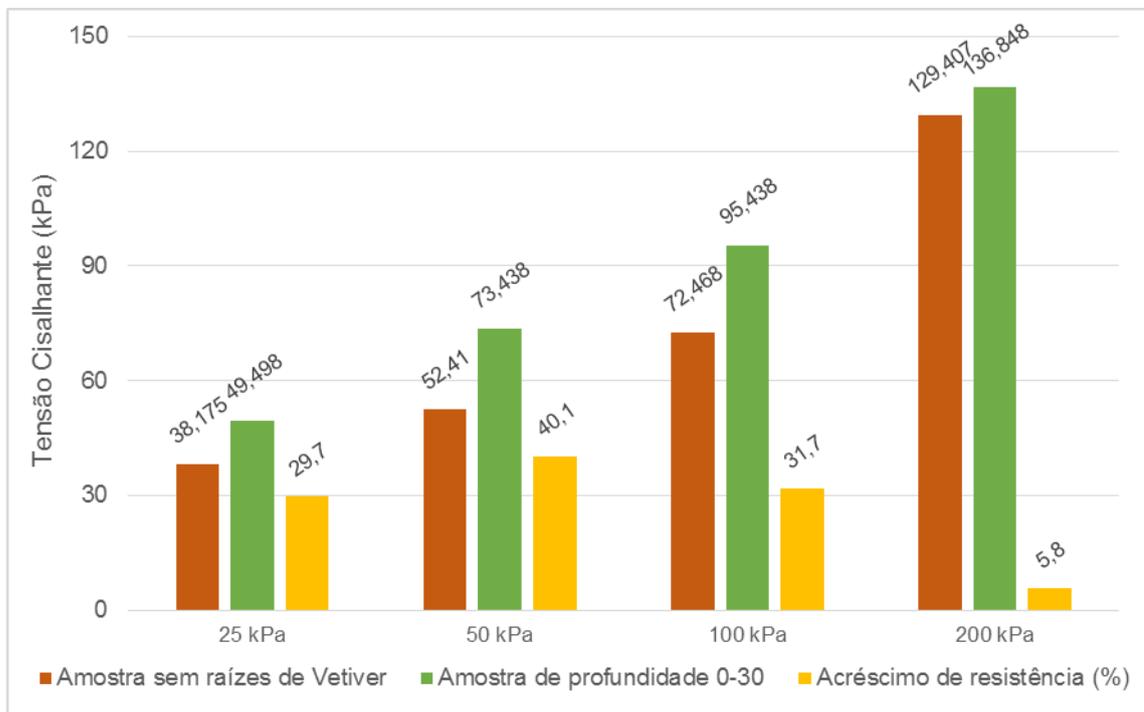


Ao analisar as tensões cisalhantes para a deformação de 5mm, por exemplo, percebe-se um considerável acréscimo de resistência da amostra com raízes de Vetiver em relação à amostra sem raízes. Na curva de tensão de 50 kPa, foi preciso uma tensão de 52,41 kPa para causar uma deformação de 5 mm na amostra sem

raízes, enquanto para a amostra com raízes foi necessário 73,43 kPa para causar a mesma deformação. O mesmo comportamento se repete quando são analisados outros valores de deformação.

A figura 4.2.3 sintetiza os valores de tensão cisalhante para essa mesma deformação, considerando todas as faixas de tensão dos ensaios. Mostra também a porcentagem de acréscimo de tensões da amostra com raízes de Vetiver de profundida 0-30 em relação à amostra sem raízes.

Figura 4.2.3 – Gráfico comparativo para uma deformação de 5mm das amostras sem raízes de Vetiver e com raízes de profundidade 0-30.



As figuras 4.2.4 e 4.2.5 apresentam o gráfico Deformação vertical x Deformação horizontal para as amostras sem raízes de Vetiver e com raízes na profundidade 0-30, respectivamente.

Figura 4.2.4 – Gráfico Deformação vertical x Deformação horizontal da amostra sem raízes de Vetiver.

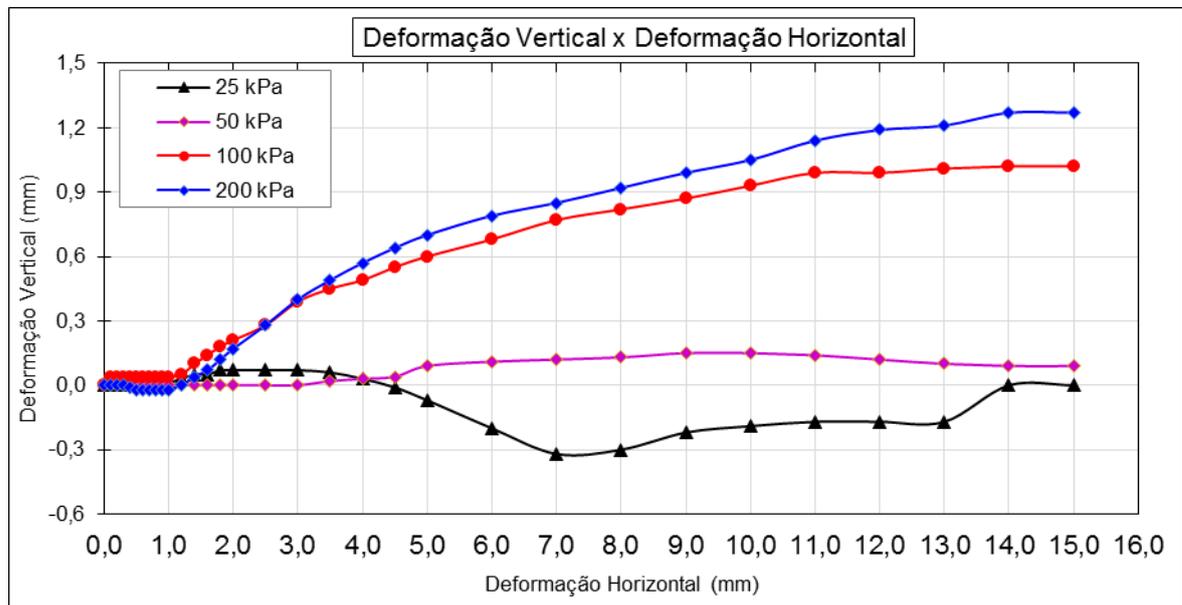
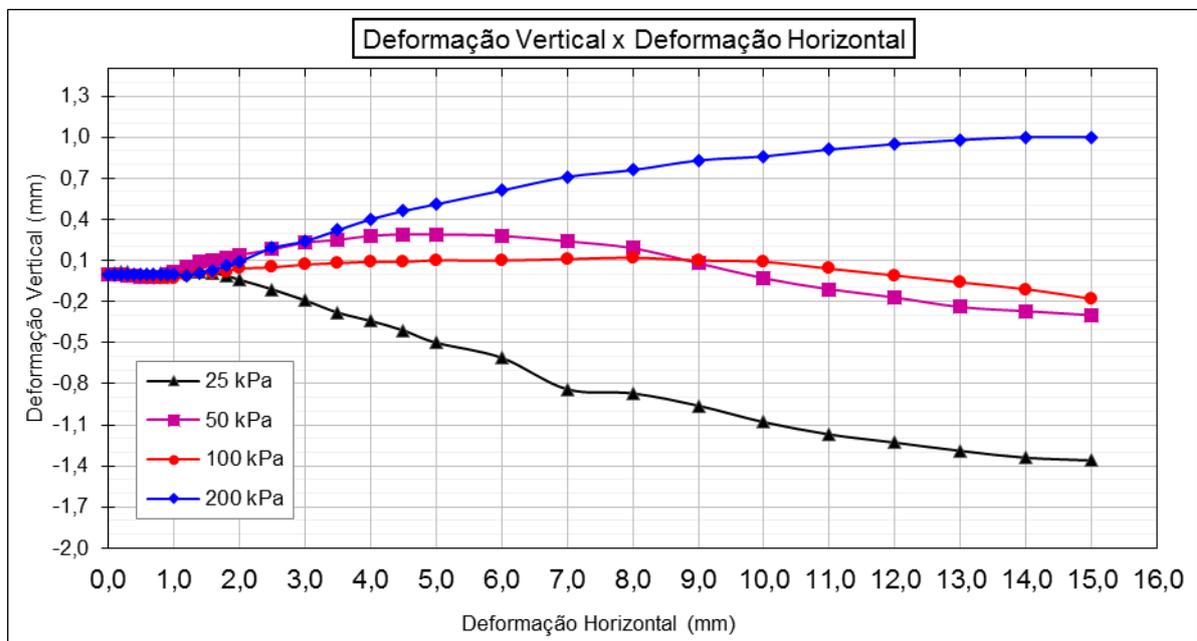


Figura 4.2.5 – Gráfico Deformação vertical x Deformação horizontal da amostra com raízes de Vetiver de profundidade 0-30.



Os menores valores de deformação apresentados pela amostra com raízes se deve ao “reforçamento radicular” mencionado por Coelho e Pereira (2006). O aumento da resistência ao cisalhamento do solo está vinculado diretamente à

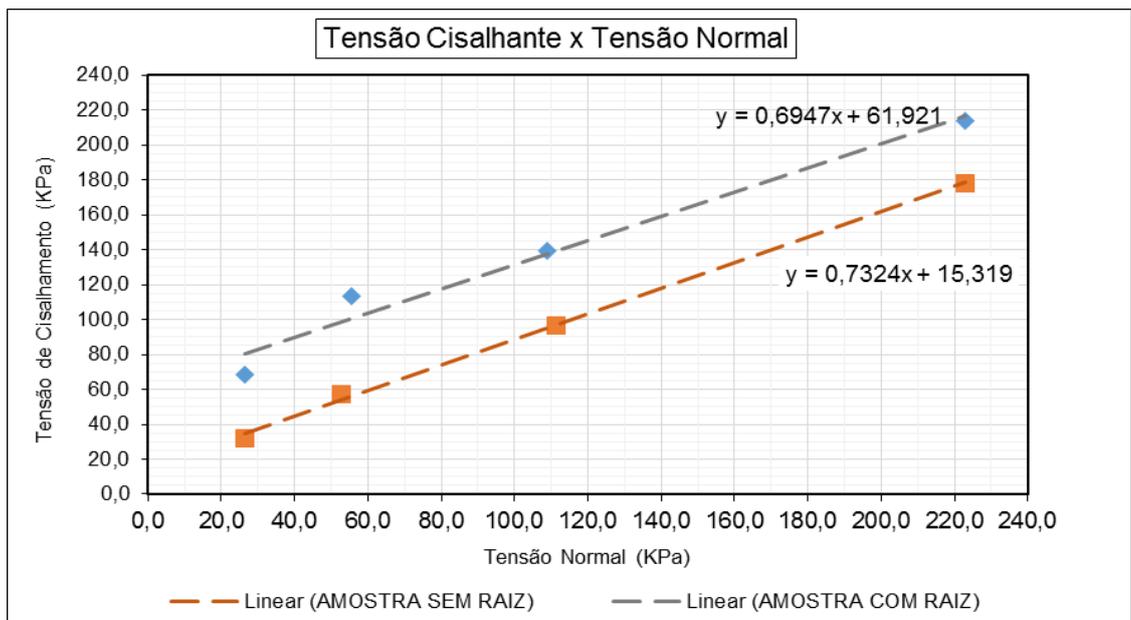
transferência direta das tensões de cisalhamento para a resistência das raízes à tensão, diminuindo inclusive os deslocamentos de massas de solo.

Os maiores valores de coesão das amostras com raízes também justificam os menores valores de deformação dessas amostras.

Barbosa (2012) submeteu amostras com raízes de vetiver com um, dois e três anos de idade à ensaios de cisalhamento direto. Destaca em sua pesquisa que o comportamento do solo com idade de um e dois anos de plantio de vetiver em relação aos deslocamentos horizontais e verticais é parecido com o comportamento do solo sem vegetação. Já para as amostras de três anos, os valores dos deslocamentos e tensões já tem uma mudança significativa. Desta forma ela considera que o Vetiver oferece um aumento de resistência ao cisalhamento do solo a partir de três anos de plantio.

A figura 4.2.6 apresenta a envoltória de ruptura para as amostras sem raízes de Vetiver e com raízes na profundidade de 0-30cm, respectivamente. Trata-se do gráfico tensão normal x tensão cisalhante, que forneceram os valores de coesão e ângulo de atrito para cada amostra.

Figura 4.2.6 – Envoltória de ruptura das amostras sem raízes de Vetiver e com raízes de Vetiver de profundidade 0-30.



O gráfico mostra claramente o incremento de resistência provocado pelas raízes. A reta correspondente à amostra sem raízes de Vetiver apresenta menores

valores de tensão normal e cisalhante, e apresenta também menor valor de coeficiente linear, que corresponde ao intercepto de coesão da amostra.

Se observarmos por exemplo o ponto em que a tensão normal vale 120 kPa e a tensão cisalhante também vale 120 kPa no gráfico 4.2.6. Em uma situação com esses valores de tensão, uma amostra sem raízes já teria se rompido, enquanto a amostra com raízes não, evidenciando o incremento de resistência proporcionado pelas raízes.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A partir dos ensaios feitos nesse trabalho e dos resultados obtidos, pode-se concluir que as raízes do Vetiver de fato influenciam os parâmetros de resistência do solo. A coesão aumentou consideravelmente em relação aos valores obtidos das amostras sem raízes, enquanto os valores de ângulo de atrito permaneceram na mesma ordem.

Segundo Barbosa (2012), ensaios de cisalhamento direto realizados em amostras contendo Vetiver com idade de 1 e 2 anos apresentaram comportamento semelhante às amostras sem raízes, sendo observadas melhorias somente a partir de amostras com idade de 3 anos ou mais, como é o caso desse trabalho.

Nas comparações da envoltória de ruptura para todas as amostras, observou-se aumento de resistência em todas as amostras contendo raízes em relação às amostras sem raízes.

Propõe-se que pesquisas futuras realizem o ensaio de cisalhamento direto com amostras de vetiver com outros valores de tensão normal. Ensaio com menores valores de tensões normais representariam melhor condições reais de menores profundidades. Propõe-se também a realização de ensaios com amostras inundadas, para aumentar os parâmetros quantitativos na literatura do uso do Vetiver.

A literatura sobre Vetiver aponta alguns estudos feitos com Vetiver avaliando densidade, diâmetro, inclinação e resistência à tração das raízes. Sugere-se então que tais parâmetros também sejam levados em conta em trabalhos futuros.

A realização de outros tipos de ensaios para obtenção dos parâmetros de resistência do solo com o Vetiver também seria interessante, como ensaios triaxiais, por exemplo, além de pesquisas que abordem melhor os efeitos do Vetiver sobre o solo em suas diferentes idades.

REFERÊNCIAS

- ABNT . ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9.604:** Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1986
- ABNT . ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.459:** Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016
- ABNT . ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.180:** Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016
- ABNT . ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.181:** Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016
- ALBUQUERQUE, P. Notas de Aulas, Faculdade de Engenharia de Sorocaba, 2003
- ANDRADE, A. G.; CHAVEZ, T. A. **Vetiver, o capim campeão contra a erosão**, Agro DBO, 2014
- BARBOSA, M. C. R. **Estudo da aplicação do vetiver na melhoria dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos em taludes**. Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, 2012. Tese de Doutorado.
- BRAJA, M das, **Fundamentos de engenharia geotécnica**, tradução da sexta edição norte americana; editora Thomson, 2007
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, volume 1, 6ª edição, Livros técnicos e científicos editora.1988
- CHAVES, T. A.; ANDRADE, A. G. **Capim Vetiver, produção de mudas e uso no controle da erosão e na recuperação de áreas degradadas**, Manual técnico 39, Niterói – RJ, 2013
- COELHO, A. T. PEREIRA, A.R. **Efeitos da vegetação na estabilidade de taludes e encostas**. Boletim Técnico, ano 01, nº 002, Belo Horizonte. Editora FAPI Ltda 2006
- CRAIG, R. F. **Mecânica dos Solos**. 7ª edição. Tradução Amir Kurban. Rio de Janeiro Editora LTC, 2007
- FIORI, A. P. & CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas, aplicações na estabilidade de taludes**. 2ª edição. Curitiba, Editora UFPR, 2009
- ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3ª edição. . Rio de Janeiro: Terratek, 2007

PEREIRA, A. R.. **Uso do Vetiver na Estabilização de taludes e Encostas**. Boletim Técnico, ano 01, nº003. Belo Horizonte. Editora FAPI Ltda., 2006. 22p.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 2ª edição. São Paulo, Oficina de Textos, 2002

TRUONG, P.; VAN, T. T. & PINNERS, E. **Vetiver system applications: technical reference manual**, 2.ed. Vietnam: The Vetiver Network International, 2008. 127p.

<http://deflor.com.br/wp-content/uploads/2012/11/pok3.jpg> acessado em 03/03/2017.

<http://sistemavetiver.blogspot.com.br/2016/04/uso-do-capim-vetiver-na-descompactacao.html> acessado em 01/12/2016.

<http://sistemavetiver.blogspot.com.br/p/o-capim-vetiver.html>, acessado em 27/11/2016.