



**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E
ESTABILIDADE DE TALUDES DE
VOÇOROCAS EM SOLOS DA REGIÃO DE
LAVRAS, MG**

WELLINGTON WILLIAN ROCHA

2003



.....

.....

.....

WELLINGTON WILLIAN ROCHA

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E ESTABILIDADE DE
TALUDES DE VOÇOROCAS EM SOLOS DA REGIÃO DE LAVRAS,
MG.

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do Programa de Pós-graduação em
Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de
“Doutor”.

Orientador

Prof.Dr. Moacir de Souza Dias Junior

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL

2003

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Rocha, Wellington William

**Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos
da região de Lavras, MG / Wellington William Rocha. -- Lavras : UFLA, 2003.**

101 p. -- il.

Orientador: Moacir de Souza Dias Junior

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia

**1. Cisalhamento. 2. Talude. 3. Voçoroca. 4. Erosão. I. Universidade Federal de
Lavras. II. Título.**

CDD-631.45

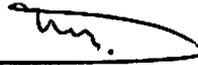
WELLINGTON WILLIAN ROCHA

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E ESTABILIDADE DE
TALUDES DE VOÇOROCAS EM SOLOS DA REGIÃO DE LAVRAS,
MG.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Doutor".

Aprovada em 31 de dezembro de 2003

Prof. Dr. José Maria de Lima	UFLA
Prof. Dr. Mozart Martins Ferreira	UFLA
Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira	UFG
Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães	EPAMIG



Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior

UFLA

Orientador

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL

*A minha família pela compreensão e
credibilidade dispensada durante todo
o tempo*

OFEREÇO

*À minha esposa Lose e a meu filho
Arthur, por tudo que me proporcionam
de bom.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, pela Oportunidade de realização do Curso;

Ao Professor Doutor Moacir de Souza Dias Junior, pelos ensinamentos, orientação, total apoio e amizade no decorrer do curso;

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo;

À FAPEMIG pelo fundamental apoio na aquisição de equipamentos;

Ao Professor Doutor José Maria de Lima, pelo apoio, amizade e Co-orientação;

À Fundação de Ensino Superior de Passos pelo apoio e incentivo;

À Coordenação de Pós-graduação em especial à pessoa do Professor Doutor Luiz Roberto Guimarães Guilherme, que não mediu esforços para que este trabalho pudesse ser concretizado;

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. José Maria de Lima, Prof. Dr. Mozart Martins Ferreira, Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira e Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, pela participação e sugestões apresentadas;

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, especialmente a Dulce Claret e Delane e Adriana;

Ao estudante de Iniciação Científica Fábio Lúcio dos Santos e o estudante de graduação em Engenharia Agrícola Rodrigo (Patinete), pela dedicação e apoio na realização desse trabalho;

Ao Professor Doutor Vicente Gualberto, que com toda sua sapiência tornou mais agradáveis os momentos difíceis.

A todos os Colegas do Departamento de Ciência do Solo em especial ao meu Amigo Dr. Marcos Kondo pela profunda dedicação e amizade e ao Dr. Carlos Rogério.

Em fim ao Willian, que mesmo não mais presente entre nós, sua energia foi de fundamental importância.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	i
GENERAL ABSTRACT.....	ii
CAPÍTULO 1.....	01
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	01
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	03
1. Tensões no Solo.....	03
1.1 Tensões totais, efetivas e neutras.....	04
2 Resistência ao cisalhamento do solo.....	05
2.1 Ensaio de cisalhamento direto.....	06
3 Resistência ao cisalhamento e erosão de solos agrícolas.....	09
4 Estabilidade de Taludes.....	10
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13
CAPÍTULO 2: Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos da região de Lavras (MG)	16
RESUMO.....	16
ABSTRACT.....	17
1 INTRODUÇÃO.....	18
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4 CONCLUSÕES.....	33
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33
CAPÍTULO 3: resistência ao cisalhamento de solos com incidência de voçorocas na região de Lavras, MG.....	36

RESUMO.....	36
ABSTRACT.....	37
1 INTRODUÇÃO.....	38
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	42
2.1. Solos.....	42
2.2 Ensaio de Cisalhamento.....	43
2.3 Preparo das amostras.....	45
2.4 Ensaio de Cisalhamento Direto.....	45
2.5 Determinações físico-químicas das amostras de solo.....	45
2.5.1 Análise Textural.....	45
2.5.2 Densidade do solo.....	45
2.5.3 Densidade de partículas.....	46
2.5.4 Mineralogia.....	46
2.6 Matéria Orgânica.....	46
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
3.1 Envoltórias de resistência ao cisalhamento para os horizontes A, B e C para cada classe de solo estudada.....	48
3.1.1 CXBd1.....	48
3.1.2 LVd.....	50
3.1.3 LVAd.....	53
3.1.4 CXBd2.....	55
3.2 Envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes.....	59
3.2.1 horizonte A.....	59
3.2.2 horizonte B.....	61

3.2.3 Horizonte C.....	63
3.3 Envoltórias de resistência ao cisalhamento dos taludes totais.....	66
4 CONCLUSÕES.....	69
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
CAPÍTULO 4: Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas da região de Lavras, MG.....	74
RESUMO.....	74
ABSTRACT.....	76
1 INTRODUÇÃO.....	77
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	83
2.1 Caracterização das voçorocas.....	83
2.2 Amostragem dos solos.....	84
2.2.1 Preparo das amostras.....	86
2.2.2 Ensaio de cisalhamento direto.....	86
2.3 Estabilidade dos taludes.....	86
2.3.1 Avaliação dos Taludes.....	87
2.3.1 Fator de segurança e índice relativo de atividade.....	89
2.4 Bermas.....	90
2.5 Determinação do ângulo estável de inclinação do talude.....	90
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
3.1 Horizontes A+B e Horizontes C.....	93
3.2 Índice Físico Relativo de Atividade.....	96
4 CONCLUSÕES.....	97
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

RESUMO GERAL

ROCHA, Wellington Willian. Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG. 2003. 101 p. Tese (Doutorado em solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

A erosão por voçorocas é uma preocupação em nível mundial, principalmente quando se trata de estabelecer práticas de controle e estabilização. O conhecimento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento torna-se cada vez mais fundamental na implementação de técnicas de retaludamento de voçorocas. Baseado nisso os objetivos desse estudo foram: a) avaliar a resistência ao cisalhamento de cinco solos da região de Lavras, MG, b) Avaliar a resistência ao cisalhamento de taludes três voçorocas da região de Lavras, MG e c) propor ângulos de estabilidade para os taludes dessas voçorocas com base nos parâmetros da resistência ao cisalhamento. Assim, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em cinco solos da região de Lavras, MG, sendo eles: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd); Latossolo Vermelho Distrófico (LVdf); Latossolo Vermelho distroférico (LVdf); Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (PVAd) e Cambissolo Háplico Tb distrófico típico (CXBd) todos estabilizados na tensão 0,01 MPa. Os solos LVAd e PVAd, com estrutura em blocos, maiores quantidades de areia e maiores densidades do solo, se mostraram mais resistentes ao cisalhamento. Em ensaio de cisalhamento realizado em taludes de voçorocas desenvolvidas classes de solo LVAd, LVdf e CXBd1 e CXBd2, verificou-se que o horizonte A mostrou-se mais resistente do que os demais em função do maior conteúdo de matéria orgânica presente nesse horizonte. Em contrapartida, o horizonte C foi o menos resistente ao cisalhamento, fato esse que se deve principalmente em função da maior quantidade de silte presente nesses horizontes. De acordo com estas observações, o LVAd foi um dos solos mais resistentes ao cisalhamento. Uma maior resistência foi observada também para o CXBd2, solo esse que sofreu a aplicação da força cisalhante no sentido perpendicular da xistosidade apresentada por esse solo. De posse dos parâmetros c e ϕ obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, foram calculados os ângulos que darão estabilidade aos taludes das voçorocas dos referidos solos e observou-se que o CXBd1 foi o solo que teve a aplicação da força cisalhante no sentido longitudinal da xistosidade, apresentando menor ângulo de retaludamento, sugerindo que seja este solo o que requer mais cuidados quando se trata de erosão por voçorocas.

* Comitê de orientação: Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA; Prof. Dr. José Maria de Lima - UFLA

GENERAL ABSTRACT

ROCHA, Wellington Willian. Shear strength and gullies slope stability of the soils of Lavras, MG, region. 2003. 101 p. Thesis (Doctorate in Soil and Plant Nutrition) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. *

The gully erosion is a concern in world level, mainly when it is establishing control practices and stabilization. The knowledge of the soil shear strength parameters becomes more and more fundamental in the implementation of techniques to modify the gullies slopes stability. The objective of this study were: a) to evaluated the shear strength of five soils from Lavras (MG) region, b) to evaluated the slope shear strength of tree gullies from Lavras (MG) region and c) to propose slope stability angles of those gullies base on the shear strength parameters. Direct shear strength tests were conducted using five soils from Lavras, MG, region being them: Red-Yellow Latosol (LVAd), distroferric Red Latosol (LVd), distroferric Red Latosol (LVdf), Red-Yellow Ultisol (PVAd) and Inceptosol (CXBd) all equilibrated at 0,01 MPa tension. The soils LVAd and PVAd, with block structure, larger amounts of sand and larger bulk densities, were more resistant to the shear. In the shear strength test accomplished in the gully slope developed in the soil classes LVAd, LVdf and CXBd1 and CXBd2, it was verified that the A horizon showed more resistant than the others in a function of the largest organic matter content present in that horizon. In contrast, the C-horizon was the least resistant to the shear, due to the largest amount of silt present in this horizon. In agreement with these observations, the LVAd was the most resistant to the shear. A larger resistance was also observed in the CXBd2, soil that suffered the application of the shear force perpendicular to the soil xistosity. With the c and ϕ parameters obtained in the direct shear strength test, the angles that will give stability to the gullies slopes of the soils were calculated and it was observed that CXBd1 was the soil that had the application of the shear force longitudinal to the xistosity, presented smaller stability angle, suggesting that this soil requests more concerns when the gullies erosion is treated.

* Guidance Committee: Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior – UFLA; Prof. Dr. José Maria de Lima - UFLA

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

Modelar o processo de voçorocamento não é uma tarefa simples, dada à heterogeneidade dos fenômenos responsáveis pela sua formação. Baseado nisso, diversos pesquisadores vêm desenvolvendo modelos empíricos na tentativa de explicar matematicamente o processo de voçorocamento.

Um destes modelos matemáticos, baseado na teoria proposta por Foster & Lane (1983), Watson et al. (1986) e Sidorchuck (1999), foi desenvolvido por Torri & Borselli (2003). Este modelo leva em consideração o alargamento da voçoroca através da produção e remoção dos sedimentos e o aprofundamento do canal. Para tanto, o processo é dividido em duas partes distintas, uma caracterizada pela rápida incisão durante o voçorocamento e outra parte em que ocorre a estabilização.

Esses autores, em associação com Vandaele et al. (1996), Vandekerckhove (1998) e outros, acreditam ser necessário primeiro modelar o processo de voçorocamento para depois um modelo de estabilização ser desenvolvido para os taludes das voçorocas.

Um modelo, também empírico para obtenção do ângulo estável de voçorocas foi desenvolvido por Sidorchuck (1999), modelo esse que considera a voçoroca como um canal de escoamento de água. Em complementação a este modelo, Sidorchuck (2003) acrescentou a variável rugosidade relativa da parede da voçoroca. Este estudo se torna cada vez mais importante, mas como relata o próprio autor, para aprimoramento da construção de canais de irrigação e drenagem.

Para Rocha et al. (2001) estes modelos apresentados por Sidorchuck (1999) e Sidorchuck (2003), ressaltam quase que em sua totalidade somente as características hidráulicas dos solos, que, em muitos casos, pode subestimar o equilíbrio das forças atuantes no talude de terra. Assim, Rocha (2001), embasado na teoria de Foster & Lane (1983), propôs um modelo dinâmico de retaludamento de voçorocas, que considera o equilíbrio de forças atuantes em um talude de terra. Para o desenvolvimento e aplicação desse modelo, torna-se imprescindível o conhecimento dos parâmetros da resistência ao cisalhamento do solo.

Embora ainda pouco utilizada em aplicações agrícolas, a resistência ao cisalhamento do solo é, segundo Baver et al. (1960), uma das principais propriedades dinâmicas dos solos, pois se correlaciona com atributos como: densidade do solo, resistência à penetração, porosidade, grau de intemperismo (Rocha et al., 2002) e outras, importantes em estudos de degradação física dos solos. A resistência ao cisalhamento pode ser obtida em diferentes ensaios, sendo o de cisalhamento direto, segundo Rocha et al. (2002), o mais operacional pela rapidez na obtenção dos resultados quando comparados a outros métodos. Conhecer a resistência de um solo ao cisalhamento significa aplicar diferentes cargas normais a um corpo de prova e verificar o esforço necessário para cortar esse solo até a ruptura.

Embora exista ainda carência de estudos em cisalhamento dos solos agrícolas, os resultados encontrados até o presente momento (Rocha et al., 2001; Silva, 2002 entre outros) têm se mostrado coerentes, pois modelos de sustentabilidade agrícola são passíveis de serem desenvolvidos a partir de modelos como capacidade suporte cargas do solo (Silva, 2002) e estabilização de taludes em terra (Rocha, 2001).

Os objetivos desse estudo foram: a) avaliar a resistência ao cisalhamento de cinco solos da região de Lavras, MG, b) relacionar essas informações de

resistência ao cisalhamento com o grau de intemperismo do solos estudados c) avaliar a resistência ao cisalhamento de taludes três voçorocas da região de Lavras, MG e d) propor ângulos mais estáveis para os taludes dessas voçorocas com base nos parâmetros da resistência ao cisalhamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

1. Tensões no Solo

No estudo da distribuição das tensões e suas conseqüências sobre os solos agrícolas, muitos procedimentos utilizados para outros materiais são utilizados, embora os solos agrícolas não apresentem características homogêneas (Upadhyaya et al., 1994). Isto requer que cada análise seja feita com o máximo de condições controladas possível, o que de certa forma limita o estudo destas tensões atuantes sobre o solo.

Um estudo de distribuição de tensões no solo se faz necessário, pois em se tratando de resistência ao cisalhamento, esta é resultado do movimento e do contato entre as partículas (Misra et al., 2001). Dependendo da magnitude deste contato, a distribuição de tensões pode ser maior ou menor a qual acarretará variações na resistência ao cisalhamento do solo e de certa forma, influenciará na resistência deste solo aos agentes promotores de erosão.

No interior de uma massa de solo, um ponto qualquer, está sob influência de esforços externos devido ao próprio peso do solo e a forças externas aplicadas (Pinto, 1989). Os esforços se transmitem no interior da massa,

de modo que, em qualquer parte, haverá solicitação do material a qual este opõe esforços resistentes chamados de tensões, cuja intensidade é medida pela força por unidade de área. As tensões em um plano passando por um ponto do solo podem sempre ser decompostas em tensões de cisalhamento (τ) e tensões normais ao plano (σ).

Num ponto do solo, as tensões normais e de cisalhamento variam conforme o plano considerado. Existem sempre três planos em que não ocorrem tensões de cisalhamento (Ortigão, 1995). Estes planos são ortogonais e recebem o nome de planos de tensões principais. As tensões normais a estes planos recebem o nome de tensões principais; a maior delas é chamada de tensão principal maior (σ_1), a menor é denominada de tensão principal menor, (σ_3) e a outra é chamada de tensão principal intermediária (σ_2).

Em mecânica dos solos considera-se, de maneira geral, o estado de tensões num plano que contém as tensões principais maior e menor, desprezando-se o efeito da tensão principal intermediária. No estado duplo de tensões, conhecendo-se os planos e as tensões principais num ponto podem-se sempre determinar as tensões normais e de cisalhamento em qualquer plano passando por este ponto.

1.1 Tensões totais, efetivas e neutras.

O comportamento mecânico do solo depende grandemente de como cada fase, sólida, líquida e gasosa, resiste aos esforços solicitantes (Pinto, 1989). A Tensão total (σ) é definida como sendo a força total transmitida numa secção de um determinado plano dividida pela área desta secção. A Tensão neutra (u) representa a tensão da água num ponto do solo. Ela é constante para qualquer

plano que passa por este ponto. A Tensão efetiva (σ') é a parcela da tensão total resistida pela estrutura do solo. Um dos princípios da Mecânica dos solos, introduzido por Terzaghi et al. (1997), é o de que em solos saturados, a tensão efetiva é igual à diferença entre a tensão total e a tensão neutra.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

2 Resistência ao cisalhamento do solo

A resistência ao cisalhamento de um solo é a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, a qual é representada pela tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura ocorre. Qualquer problema de ruptura em Mecânica de Solos envolve, portanto, uma superfície de ruptura, que pode ser definida a priori como sendo aquela, em cujos pontos, a tensão de cisalhamento atinge o valor limite da resistência ao cisalhamento. A resistência ao cisalhamento dos solos pode, ser expressa pela equação de Coulomb (Ramamurthy, 2001).

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg}\phi \quad (2)$$

em que τ é a máxima tensão cisalhante suportada pelo solo, σ_n é a tensão normal a que a superfície de falhamento está submetida, c é o intercepto de coesão ou coesão aparente do solo, e ϕ é o ângulo de atrito interno do solo, definido como sendo o ângulo que a força normal faz com a resultante das forças que o maciço terroso está submetido. Esta equação define a envoltória de resistência (Figural. 1), que é a linha limite de resistência dos solos, ou seja, qualquer tensão cisalhante que esteja acima desta linha promoverá a ruptura do solo. Os parâmetros c e ϕ são intrínsecas dos solos (Benjamim & Cruse, 1985; Ramamurthy, 2001; Zang et al., 2001) e, se σ_n é nulo, a expressão $\sigma_n \operatorname{tg}\phi$ será nula e a resistência ao cisalhamento do solo será dependente apenas do intercepto de coesão.

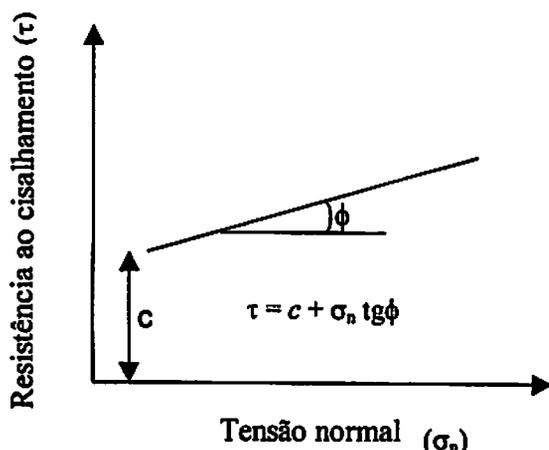


Figura 1.1. Envoltória de resistência definida como a relação linear entre tensão normal e de cisalhamento.

A resistência ao cisalhamento dos solos é essencialmente um fenômeno de atrito. No entanto, nesse estudo, a coesão determinada é a coesão aparente ou intercepto de coesão (c). Este parâmetro é uma parcela da resistência ao cisalhamento dos solos presente apenas em solos parcialmente saturados em consequência da maior ou menor tensão capilar (Pinto, 1989; Vargas, 1989; Azevedo, 1999). Saturando-se ou secando-se o solo totalmente, este parâmetro desaparece, donde o nome de aparente.

2.1 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto consiste na obtenção da resistência ao cisalhamento do solo com medição da força cisalhante em apenas uma direção. O equipamento, (Figura 1.2), possui uma caixa separada em duas partes: superior e inferior, sendo que a parte superior se mantém fixa enquanto a inferior se desloca horizontalmente com velocidade constante. A amostra indeformada de solo é colocada na caixa de cisalhamento onde também consta uma placa

porosa no fundo da caixa e outra sobre a amostra. A função dessas placas porosas é a de promover a drenagem, uma vez que, neste tipo de ensaio, as tensões neutras não são medidas.

A superfície de contato entre a amostra de solo e as pedras porosas possuem ranhuras que impedem o deslizamento da amostra durante o ensaio.

O primeiro passo para a realização do ensaio é a aplicação de uma força vertical. A força vertical aplicada no início do ensaio dividida pela área transversal da amostra fornece a tensão normal. A seguir aplica-se uma força horizontal crescente em uma das extremidades da caixa, provocando o deslocamento de uma parte em relação à outra. O esforço resistente a este deslocamento é a sua resistência ao cisalhamento em função da tensão vertical aplicada.

Estudos recentes do Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Lavras demonstram que 2mm min^{-1} é uma velocidade adequada para solos com quantidades de argila menores que 60 g kg^{-1} , pois esta velocidade deve ser tal que permita um arranjo das partículas do solo durante o ensaio, aproximando-se mais da real condição de campo (Rocha et al. 2001). Alguns autores têm sugerido velocidades baixas, $10^{-4}\text{ mm min}^{-1}$, sem sequer relacioná-las à textura do solo, pois solos com maiores quantidades de areia possuem uma capacidade de rearranjo mais rápido e acirrado do que solos mais argilosos (Dias Júnior & Miranda, 1999), o que permite a utilização de velocidades maiores. Velocidades muito baixas tornam o ensaio mais lento e, dependendo do número de amostras, este ensaio é antioperacional.

O resultado do ensaio é registrado numérica e graficamente pela variação da tensão de cisalhamento em função da deformação (Terzaghi et al., 1997). Valores de variação volumétrica da amostra também são possíveis de se obter com este ensaio, através do uso de extensômetros instalados no equipamento.

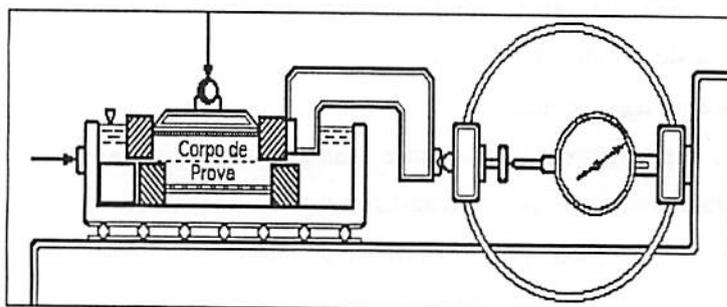


Figura 1.2. Caixa de cisalhamento utilizada em ensaios de Cisalhamento Direto.

A tensão de cisalhamento da ruptura é geralmente considerada como a maior tensão de cisalhamento resistida pelo corpo de prova, embora, em casos especiais, ela possa ser considerada como a tensão para uma certa deformação ou a tensão residual após longo deslocamento (Vargas, 1989; Lee, 1996). A tensão normal e a tensão de cisalhamento na ruptura determinam a envoltória de resistência. Esta envoltória pode ser determinada pelos resultados de uma série de ensaios de cisalhamento direto, com diferentes tensões normais.

Como a tensão normal e de cisalhamento, neste tipo de ensaio, são conhecidas só num plano, o estado de tensões no solo nos diferentes planos não é conhecido (Vargas, 1989). O ensaio de cisalhamento direto é mais simples, mas não permite a obtenção de tensões neutras, nem pode ser realizado com total impedimento de drenagem (Ortigão, 1995). Por outro lado, a maneira pela qual os esforços cisalhantes são aplicados provoca uma heterogeneidade de tensões ao longo do plano de cisalhamento, que torna o efeito de ruptura progressiva, em alguns casos, de grande importância (Terzaghi et al., 1997).

3 Resistência ao cisalhamento e erosão de solos agrícolas

Os processos de erosão hídrica ocorrem principalmente por intermédio da interação física do impacto da chuva e o escoamento superficial que se dá na superfície do solo. Pesquisadores têm mostrado que as propriedades físicas do solo influenciam os processos erosivos Misra & Teixeira (2001). Uma vez que o processo erosivo representa uma interação de forças, estudos de resistência ao cisalhamento, para caracterizar a estrutura dos solos, passam a ser de suma importância.

A resistência ao cisalhamento do solo pode representar uma medida de resistência ao processo erosivo, sendo, portanto, muito útil em estudos de erosão, principalmente causados pela água (Zang et al., 2001). Estudos completos de avaliação dos parâmetros da resistência ao cisalhamento do solo, porém, ainda necessitam ser realizados. Misra & Teixeira (2001), trabalhando com simulador de chuva em solos de diferentes declividades, verificaram que a concentração de sedimentos erodidos foi maior para solos com menores resistências ao cisalhamento do solo, porém este trabalho gerou uma lacuna quando os autores tentaram comparar a resistência ao cisalhamento do solo com os parâmetros de erodibilidade dos solos estudados. A falha nesse estudo foi a resistência ao cisalhamento que foi estudada com diferentes umidades de solo, que não ocorreu para a erodibilidade. A coesão aparente do solo pode expressar a maior ou menor área de contato entre as partículas dos solos, e varia com o manejo do solo e com os ciclos de umedecimento e secagem, portanto a mesma classe de solo deve ser estudada em diferentes umidades, causando um bom entendimento da resistência ao cisalhamento do solo com a erodibilidade dos mesmos.

4 Estabilidade de Taludes

Por ocasião da estação das chuvas ocorre, então, um contínuo e gradual aumento do grau de saturação do subsolo (Morgan et al., 2003). Uma chuva com certa intensidade e duração terá, assim, mais sérias conseqüências quanto maior for a umidade do solo, no instante do impacto, pois ocorrerá mais rápido avanço da frente de umedecimento. Após a infiltração, a frente de umedecimento atinge uma certa profundidade, mas há uma redução da resistência ao cisalhamento do solo na zona localizada acima da frente de umedecimento, provocada pela redução total ou parcial da sucção (Williams & Shayewich, 1970). Esta diminuição de resistência ao cisalhamento pode provocar o deslizamento desta zona, contudo, o gradiente hidráulico, devido a forças capilares e gravitacionais, é geralmente muito maior e faz com que o movimento da água na direção vertical seja predominante além de ser desprezado o fluxo paralelo ao talude sem cometer erros significativos. Cessada a chuva, ocorre no subsolo uma redistribuição da água que se infiltrou, ficando o solo com umidade superior ao anterior à chuva. Uma nova chuva, atingindo o terreno com a mesma intensidade produzirá, agora, um avanço mais rápido da frente de umedecimento, por encontrar-se o solo com maior umidade, portanto, uma maior condutividade hidráulica, que reduz as tensões capilares e resistência ao cisalhamento do solo.

O retaludamento implica em mudar a geometria do talude de terra e a maior vantagem é que seus efeitos são permanentes. Taludes mais suaves são mais estáveis devido à mais efetiva utilização das propriedades inerentes ao maciço e às mudanças permanentes no sistema da forças atuantes no mesmo (Guidicini & Nieble, 1993). No entanto, somente a prática de mudança na geometria do talude não é suficientemente eficaz para promover sua total estabilização. Esta prática, para atingir melhores resultados, deve ser acompanhada de outras práticas como: a) drenagem subterrânea, que visa



diminuir os efeitos danosos do lençol freático, b) o reforço do maciço que é feito com o intuito de ancoramento do solo do talude com o auxílio de muros de arrimos, c) vegetação como a implantação de espécies vegetais que irão conferir maior resistência ao talude, principalmente através de seu sistema radicular e d) a drenagem superficial das águas provenientes da área de captação da bacia hidrográfica, com a finalidade de reduzir a força cisalhante da água e principalmente a infiltração desta água no solo.

A solução para a realização de um retaludamento de uma voçoroca com segurança e com custo não tão elevado seria primeiro realizar um rigoroso estudo de resistência ao cisalhamento do solo com diferentes umidades para então determinar o ângulo de inclinação mais adequado dos barrancos voçoroca.

Modelos matemáticos para estabilização de encostas puramente hidráulicos, como os apresentados por Sidorchuck (1999) & Sidorchuck (2003), tendem a subestimar a dinâmica das forças presentes em um talude de terra, pois não leva em consideração a condição de equilíbrio das forças atuantes no talude. Muitas vezes o ângulo de inclinação que dá estabilidade ao horizonte A não é o mesmo do horizonte B ou do C, em função da diferença na resistência ao cisalhamento (Figura 1.3). Este tipo de configuração de talude recebe o nome de bermas (Morgan et al., 2003). Há casos, porém, em que os horizontes mais superficiais não são representativos na construção do novo talude, por exemplo, em um Cambissolo que apresenta horizontes A e B pouco espessos. Não justificaria a realização de ensaios de cisalhamento para o seu retaludamento, bastaria estudar o horizonte C que é o mais representativo e que estabeleceria condições de estabilização em todo o perfil.

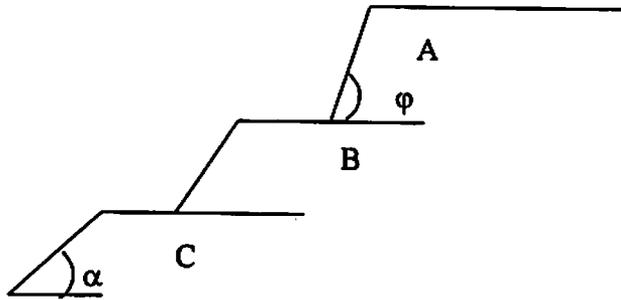


Figura 1.3. Visão esquemática de diferentes ângulos de corte para três horizontes de um solo.

Para a realização de todas estas práticas de estabilização de taludes, deve-se levar em consideração o fator econômico, pois ele justificará o destino da obra de retaludamento cujo sistema baseado somente na condição mais crítica, pode inviabilizar a obra devido ao seu alto custo e por outro lado, se o retaludamento for realizado somente com base na condição mais amena, por ocasião das chuvas, uma vez ocorrendo a saturação do perfil, este talude, possivelmente, desmoronaria. Cabe aqui ressaltar a importância da engenharia que visa ser mediadora entre estas duas condições, dando segurança a um custo não tão elevado. Um estudo da distribuição de frequência da umidade do solo, ao longo do ano, é aconselhável e torna mais fácil a decisão de qual umidade utilizar na determinação dos parâmetros da resistência ao cisalhamento do solo para fins de retaludamentos de barrancos voçoroca.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa - MG.** 1999. 169 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics.** 4. ed. New York: John Wiley, 1960. 229 p.

BENJAMIN, J. G.; CRUSE, R. M. Measurement of shear strength and bulk density of soil aggregates. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1248-1251, Sept./Oct. 1985.

DIAS, J. M. S.; MIRANDA, E. E. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras - MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 2, p. 337-346, abr./jun. 1999.

TORRI, D; BORSELLI, L. Equation for high-rate gully erosion. **Catena**, Amsterdam, v. 50, n. 2/4, p. 449-467, Jan. 2003.

FOSTER, G. R.; LANE, L. J.; NOWLIN, J. D.; LAFLEN, J. M.; YOUNG, R. A. **A model to estimate sediment yield from field-sized areas: development of the model.** Luxemburg, Austria: International Institute Of Applied Systems Analysis, 1980. 40 p

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Edgar Blucher, 1993. v. 1.

LEE, H. J. Geotechnical characteristics and slope stability. **Society Civil of Engineering**, v. 112, p. 489-509, 1996.

MISRA, R. K.; TEIXEIRA, P. C. The sensitivity of erosion and erodibility of forest soils to structure and strength. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 59, n. 1/2, p. 81-93, Apr. 2001.

MORGAN, R. P. C.; MIRTSKHOULAVA, T. S. E.; NADIRASHVILI, V.; HANN, M. J.; GASCA, A. H. Spacing of Berms for Erosion Control along Pipeline Rights-of-way. **Biosystems Engineering**, London, v. 2, n. 2, p. 249-259, June 2003.

ORTIGÃO, J. A. R. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995. v. 1, 374 p.

PINTO, C. S. Resistência ao cisalhamento dos solos. São Carlos: Grêmio Politécnico. 1989.

RAMAMURTHY, T. Shear strength response of some geological materials in triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Oxford, v. 38, n. 5, p. 683-697, 2001.

ROCHA, W. W.; DIAS JUNIOR, M. S.; LIMA, J. M. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos da região de Lavras, MG. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 297-303, abr./jun. 2002.

ROCHA, W. W.; DIAS JUNIOR, M. S.; LIMA, J. M. Shear strength as affected by soli mineralogy. In: ANNUAL MEETING OF AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY IN UNIVERSITY, 2001, North Caroline.

X SIDORCHUK, A. Dynamic and static models of gully erosion. *Catena*, Amsterdam, v. 37, n. 3/4, p. 401-414, Nov. 1999.

SIDORCHUK, A. Gully erosion modeling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland. *Catena*, Amsterdam, v. 49, n. 4, p. 312-328, Nov. 2003.

X SILVA, R. B. Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados. 2002. 142 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. *Soil mechanics in engineering practice*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1997. 499 p.

UPADHYAYA, S. K.; CHANCELLOR, W.; PERUMPRAL, J. V.; SCHAFFER, R.; GILL, W. R.; VANDENBERG, G. E. *Advances in soil dynamics*. St. Joseph: ASAE, 1994. v. 1, 304 p.

VANDAELE, K.; POESEN, J.; GOVERS, G.; VAN WESEMAEL, B. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. *Geomorphology*, Amsterdam, v. 16, p. 161-173, 1996.

VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; OOSTWOUD WIJDENES, D.; FIGUEREDO, T. de. Topographical thresholds for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean. *Catena*, Amsterdam, v. 33, n. 3/4, p. 271-292, Dec. 1998.

VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: McGraw-Hill, 1989. 509 p.

WATSON, D. A.; LAFLEN, J. M.; FRANTI, T. G. *Estimating ephemeral gully erosion*. St. Joseph: American Society Agricultural Engineering, 1986. 2020 p.

WILLIAMS, J. R.; SHAYKEWICH, C. F. The influence of soil water matric potencial on the strength properties of unsaturated soil. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v. 34, n. 6, p. 835-840, Nov./Dec. 1970.

ZANG, B.; ZHAO, Q. G.; HORN, R.; BAUMGARTL, T. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil Tillage Research*, Amsterdam, v. 59, n. 1/2, p. 97-106, Apr. 2001.

CAPÍTULO 2

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E GRAU DE INTEMPERISMO DE CINCO SOLOS DA REGIÃO DE LAVRAS (MG)

RESUMO

Atualmente, os parâmetros da resistência ao cisalhamento dos solos podem ser uma ferramenta muito útil na estabilização de taludes e recuperação de voçorocas bem como na adoção de práticas mecânicas de conservação para os solos agrícolas. Com o objetivo de avaliar a resistência ao cisalhamento de cinco solos da região de Lavras - MG e sua relação com o grau de intemperismo, realizou-se um experimento, utilizando uma prensa de cisalhamento direto, a qual permite ensaiar amostras indeformadas de solos. Essas amostras foram coletadas na profundidade de 0-0,03 m e submetidas ao ensaio de cisalhamento, para a definição das envoltórias de resistência e obtenção da coesão aparente (c) e o ângulo de atrito interno (ϕ). Observou-se que c , de forma geral, foi maior para solos que apresentaram maior densidade do solo, umidade a 0,01Mpa e maior quantidade de areia. Os valores de (ϕ) foram maiores nos solos com maiores quantidades de argila. O Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) e o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (PVAd), com densidades do solo, quantidades de areia e umidade a 0,01MPa maiores, apresentam maiores resistências ao cisalhamento em relação ao Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Cambissolo Háplico Tb distrófico (CXbd) e Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), que apresentam maiores quantidades de argila e matéria orgânica. Para a classe dos Latossolos, a resistência ao cisalhamento foi maior onde os índices K_i e K_r foram mais elevados, graças à estrutura em blocos apresentada pelo LVAd, que condicionou maior resistência ao cisalhamento. Do ponto de vista da resistência ao cisalhamento, os solos LVAd e PVAd apresentaram maior resistência ao cisalhamento que reflete maior resistência ao voçorocamento e ao preparo.

ABSTRACT

SHEAR STRENGTH AND WEATHERING RATE OF FIVE SOILS IN THE LAVRAS (MG) REGION.

Nowadays, the soil shear strength parameters can be a very useful tool in the slopes stabilization and gully erosion recovery as well as in the adoption of mechanical conservation practices for the agricultural soils. To evaluate the shear strength of five soils of Lavras, MG, region and its relationship with the weathering degree, an experiment was carried out using a direct shear machine, which allows to test undisturbed soil samples. Those soil samples were collected at 0-0.03 m depth and submitted to the shear strength test, for the definition of the strength envelope and to obtain the apparent cohesion (c) and the internal friction angle (ϕ). It was observed that c , in a general way, was larger for the soils that presented larger bulk densities, moisture at 0.01 Mpa and larger amount of sand. The (ϕ) values were larger in the soils with larger clay contents. The Red-Yellow Latosol (LVAd) and Red-Yellow Ultisol (PVAd) with larger bulk densities, sand contents and larger moisture at 0.01 MPa, present larger shear strength than the distroferric Red Latosol (LVd), Inceptisol (CXBd) and distroferric Red Latosol (LVdf), all them with larger clay contents and organic matter. For the Latosol class, the soil shear strength was larger for higher K_i and K_r indices due to the block structure of the LVAd, which caused larger shear strength. From the shear strength point of view, the LVAd and the PVAd presented larger shear strength that reflects higher resistance to the gully erosion and to tillage practices.

1 INTRODUÇÃO

3 A carência de informações sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos agrícolas e suas relações com as demais propriedades dos solos têm limitado o desenvolvimento de técnicas que visem à estabilidade de taludes de terra, principalmente, visando à estabilidade de voçorocas. Durante o processo de evolução das voçorocas, seus taludes podem sofrer ruptura mecânica, segundo uma superfície de falhamento. Esta superfície apresenta, em todos os seus pontos, tensão de cisalhamento no limite da resistência ao cisalhamento (Vargas, 1989). Na agricultura, o estudo da resistência ao cisalhamento pode auxiliar na determinação da capacidade de suporte de carga dos solos e, conseqüentemente, na especificação do maquinário e implemento mais adequado ao sistema de manejo (Olu et al., 1986).

A resistência ao cisalhamento dos solos pode ser expressa pela equação de Coulomb, $\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg}\phi$ (Vargas, 1989), em que τ é a máxima pressão cisalhante suportada pelo solo, σ_n é a tensão normal a que a superfície de falhamento está submetida, c é o intercepto de coesão ou coesão aparente do solo e ϕ é o ângulo de atrito interno do solo, definido como sendo o ângulo que a força normal faz com a resultante das forças a que o maciço terroso está submetido. Esta equação define a envoltória de resistência, que é a linha limite de resistência dos solos, ou seja, qualquer força cisalhante que esteja acima desta linha promoverá a ruptura do solo. Os parâmetros c e ϕ são características intrínsecas dos solos (Benjamim & Cruse, 1985) e, se σ_n for nulo, a expressão $\sigma_n \operatorname{tg}\phi$ será nula e a resistência ao cisalhamento do solo será dependente apenas do intercepto de coesão.

Pelo fato de as partículas de areia, principalmente as de menor tamanho, quando submetidas a forças externas, ocuparem mais facilmente os espaços vazios do solo, aumentando, assim, a área de contato entre agregados e solos

com maiores quantidades de areia, em que as partículas não apresentem uma distribuição uniforme quanto ao tamanho, tendem a apresentar maior resistência ao cisalhamento, (Ortigão, 1995). No caso de solos argilosos, o estudo da resistência ao cisalhamento torna-se mais complexo, pelo fato de a argila ser a fração mais ativa do solo, e os processos físicos e químicos, tais como: sucessivas arações e gradagem, flutuação do lençol freático através de drenagens, adubações fosfatadas e calagem, que atuam no sentido de aumentar ou reduzir o contato entre partículas do solo, conseqüentemente, aumentarão ou reduzirão a resistência ao cisalhamento (Terzaghi et al., 1997).

A resistência ao cisalhamento do solo pode também ser usada como um indicador de compactação do solo (Ayers & Perumpral, 1982; Schjonning, 1991). Em geral, os solos mais compactados apresentam maior resistência ao cisalhamento (Azevedo, 1999), mediante a menor distância entre as partículas, que lhes confere, conseqüentemente, menor índice de vazios e requer maior esforço para prepará-los para o cultivo, ou que uma massa de solo se desloque em relação à outra.

A umidade e teor de matéria orgânica podem influenciar na resistência ao cisalhamento do solo, de forma que, em solos com baixos valores de umidade, a matéria orgânica tende a reduzir a resistência ao cisalhamento, em função da menor densidade do solo conferida por ela (Ekwue & Stone, 1995). Assim, a resistência ao cisalhamento dos solos é uma variável importante na caracterização das alterações estruturais do solo (Cruse & Larson, 1977; Davies, 1985; Gantzer et al., 1987).

Os objetivos deste trabalho foram: (a) avaliar a resistência ao cisalhamento de cinco classes de solos da região de Lavras (MG), (b) relacionar estas informações com o grau de intemperismo desses solos.] (1)

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido em amostras das seguintes classes de solos: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo suave ondulado; Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) A moderado, textura argilosa, fase cerrado, relevo suave ondulado; Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), textura argilosa, fase floresta tropical subperenefólia, relevo suave ondulado; Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (PVAd) A moderado, textura média/argilosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo ondulado e Cambissolo Háptico Tb distrófico típico (CXbd) A moderado, textura média fase floresta subcaducifólia, relevo forte ondulado, todos localizados na região de Lavras (MG).

Utilizou-se, no ensaio de cisalhamento direto, uma prensa de cisalhamento fabricada pela ELE International (Digital Shear Machine, 26-112 - 9901X0089) (Figura 2.1). O equipamento operou com velocidade de deslocamento horizontal de $3,33 \times 10^{-5}$ m/s e tensões normais de 28, 42, 55 e 69 kPa.

As amostras foram coletadas com estrutura indeformada na profundidade de 0-0,03m, em amostradores quadrados especialmente desenvolvidos para este fim, com 0,0595 m de largura e comprimento e 0,022 m de altura. Foram coletadas 16 amostras para cada classe de solo, sendo quatro repetições para quatro diferentes cargas verticais somando um total de oitenta amostras.

Todas as amostras de solo foram saturadas e equilibradas a uma tensão de 0,01MPa. A calibração do equipamento consistiu em: calibração do anel dinamométrico e nivelamento horizontal do braço de alavanca onde são aplicadas as cargas verticais, com a finalidade de evitar possíveis variações angulares, quando da aplicação das cargas, para que se possa manter a relação de

aplicação da carga normal de 1:10, ou seja, 1kgf aplicado na máquina corresponde a 10kgf aplicados na amostra. A constante do anel dinamométrico também foi aferida para diferentes cargas aplicadas, uma vez que este valor influi no cálculo e na correção da força horizontal aplicada na amostra de solo.

Após a determinação da tensão cisalhante máxima e da tensão normal aplicada, a envoltória de resistência foi traçada, obtendo-se o ângulo de atrito interno do solo e o intercepto de coesão, que representa a coesão aparente dos solos.

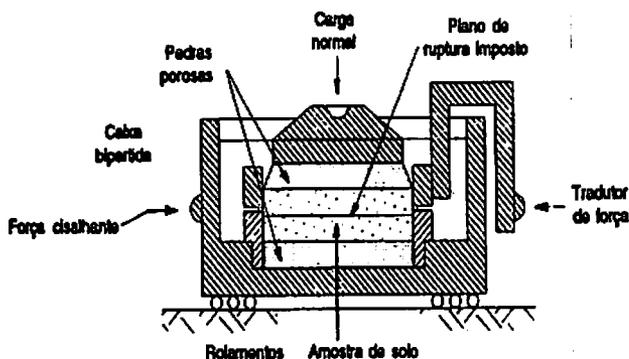


Figura 2.1. Diagrama esquemático da Caixa de cisalhamento utilizada em ensaios de cisalhamento direto.

Na tentativa de verificar a relação da resistência ao cisalhamento dos solos com o seu grau de intemperismo, foram determinados os índices K_i e K_r por meio dos teores de óxidos do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997).

Para estudar a relação entre as diferentes variáveis dos solos e suas respectivas resistências ao cisalhamento, uma vez que essa resistência é crescente com a aplicação da carga normal, calculou-se a resistência ao cisalhamento máxima de ensaio, substituindo o valor da máxima tensão normal aplicada na equação da envoltória de resistência obtida para cada solo.

As análises de regressões realizadas utilizaram o software Sigma Plot 4.0 (Jandel Scientific), e as comparações das regressões foram feitas seguindo o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 2.1, estão apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto assim como densidade do solo, quantidades de argila e areia e umidade na tensão de 0,01MPa das cinco classes de solos estudadas. Observa-se que a coesão aparente c decresceu na seguinte ordem: PVAd > LVAd > LVd > CXbd > LVdf. Já os valores do ângulo de atrito interno ϕ foram decrescentes na ordem: LVdf > LVAd > CXbd > PVAd > LVd. Pode-se notar que, com exceção do LVdf, para todas as demais classes de solo, os valores de c foram superiores aos valores de ϕ ; Por ser esta coesão aparente um dos componentes da resistência ao cisalhamento do solo e ocorrer somente em solos parcialmente saturados (Pinto, 1989), propriedades físicas e químicas, que promovam alterações na interação água-solo influem nos valores de c (Terzaghi et al., 1997).

Os valores de ϕ variaram de 6,30 a 23,75^o e, de uma maneira geral, exceto para o LVdf, observou-se uma redução de ϕ com o aumento da quantidade de argila dos solos. Os valores de ϕ , segundo Ortigão (1995), mostraram-se muito variáveis e dependentes da forma com a qual as partículas de areia e argila estavam distribuídas por tamanho e áreas de contato. Segundo este autor, não se verificou correlação entre o valor de ϕ e as características físicas e químicas dos solos. Pinto (1989), entretanto, observou que os valores de ϕ tendem a ser menores para maiores quantidades de argila dos solos.

Tabela 2.1. Densidade do solo (Ds), quantidades de argila, areia e silte, umidade na tensão de 0,01MPa (U) e resultados dos ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas, coletadas na profundidade de 0-0,03m.

Classe de solo	Ds (kg dm ⁻³)	Argila	Areia (g kg ⁻¹)	Silte	Umidade a 0,01 MPa (kg kg ⁻¹)	Ângulo de atrito interno (φ)	Coesão aparente (c) (kPa)
LVdf	1,15	570	160	270	0,21	23,75	12,56
LVd	1,12	570	250	180	0,22	6,28	38,39
LVAd	1,31	310	460	230	0,29	11,30	40,68
PVAd	1,29	370	390	240	0,28	7,80	42,39
CXbd	1,19	396	150	460	0,25	8,97	33,39

A exceção, no caso do LVdf, pode ser atribuída ao tamanho reduzido e elevada estabilidade de agregados desse solo. Tem sido sugerido na literatura que microagregados de elevada estabilidade em solos de teores mais elevados de ferro apresentam comportamento funcional de silte ou areia muito fina.

Na figura 2.2, estão representadas as envoltórias de resistência das cinco classes de solos estudadas. As envoltórias de resistência ao cisalhamento foram estatisticamente diferentes, mostrando que a tensão cisalhante é uma característica intrínseca de cada classe de solo.

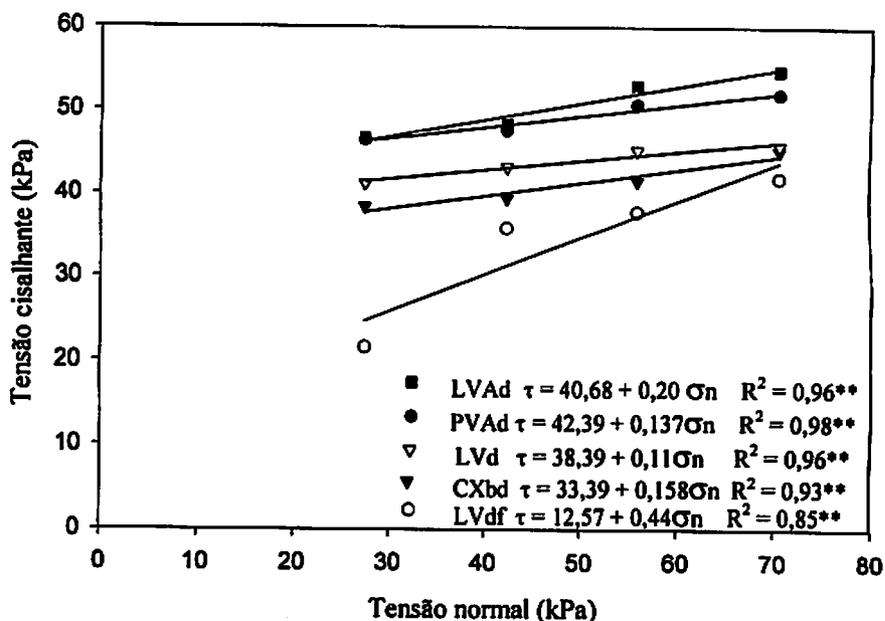


Figura 2.2. Envoltórias de resistência para os cinco solos estudados.

5 A ordem decrescente de resistência ao cisalhamento dos solos foi a seguinte: LVAd > PVAd > LVd > CXbd > LVdf. O LVAd e o PVAd apresentaram os maiores valores de tensões cisalhantes e, conseqüentemente, maior resistência ao cisalhamento. Tal comportamento pode ser explicado pela maior facilidade com que as partículas destes solos têm em ocupar os espaços vazios, quando submetidos a forças promotoras de deformações, causando assim maior atrito entre estas partículas. Esse atrito reflete se na maior resistência ao cisalhamento observada, que também se deve à estrutura em blocos desses solos, responsável pelo aumento na área de contato entre as unidades estruturais.

O LVdf e o LVd, embora apresentem maior porosidade total e drenagem mais rápida, mostraram menor resistência ao cisalhamento do que o LVAd e PVAd, provavelmente, pela redução das tensões capilares. Outro aspecto que confere menor resistência ao cisalhamento para o LVdf e LVd está

ligado ao fato de esses solos apresentarem estrutura granular, nas quais as superfícies de contato entre as partículas e microagregados são reduzidas. O CXbd, entretanto, está entre os solos de menor resistência ao cisalhamento, em razão do menor grau de evolução genética, expresso pelo maior teor de silte desse solo (Tabela 2.1), o que lhe confere um menor grau de desenvolvimento da estrutura.

Do ponto de vista de conservação do solo, esses resultados evidenciam que o LVAd e o PVAd são mais resistentes ao voçorocamento, por apresentarem maior resistência às forças cisalhantes e, conseqüentemente, ao processo de erosão. De acordo com Silva (1990), estes solos contêm menores teores de óxidos de ferro e estrutura em blocos, para o PVAd e, tendendo para blocos, para o LVAd, em alguns casos, com maior coerência entre os agregados, que ajuda a diminuir substancialmente a erosão. Espera-se, entretanto, que o LVAd e o PVAd apresentem também maior resistência mecânica ao preparo.

O LVd e o LVdf apresentam em sua estrutura grânulos em formas aproximadas de esferas, com reduzida área de contato entre elas, o que, aliado com seu pequeno tamanho, são solos mais erodíveis (Silva, 1990). A razão de os solos LVdf e LVd serem menos propensos ao voçorocamento natural, embora apresentem menor resistência ao cisalhamento, está relacionada com sua alta permeabilidade, com um solum mais profundo e ainda com as áreas de relevo plano e suave ondulado (Silva et al., 1993), o que minimiza a energia cisalhante da água.

As maiores quantidades de silte (Tabela 2.1), a pouca espessura do "solum", a baixa permeabilidade, a pobreza química acentuada e o relevo mais movimentado tornam o CXbd muito instável (Curi et al., 1990). Nesse solo, a energia cisalhante da enxurrada é mais acentuada e, além da erosão laminar causam, o surgimento de voçorocas.

Assim, espera-se que solos com estrutura em blocos sejam mais resistentes à erosão em sulcos. Na figura 2.3, observa-se que, para diferentes classes de solos, a resistência ao cisalhamento aumentou com o aumento da densidade do solo. Os solos compactados ou mais adensados, tendem a apresentar maior resistência ao cisalhamento (Azevedo, 1999), em consequência do maior contato entre as suas partículas, conferindo-lhes maior atrito (Terzaghi et al., 1997), conforme revelam o LVAd e o PVAd.

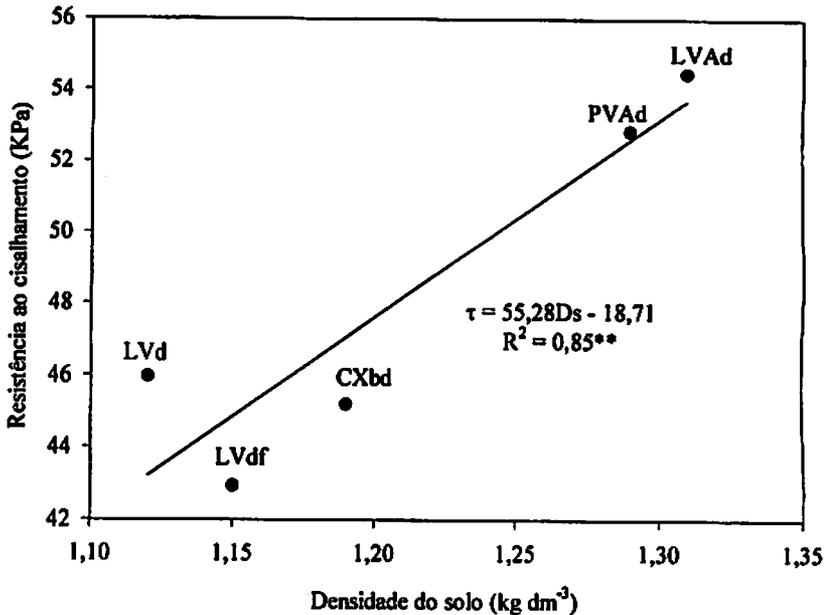


Figura 2.3. Variação da resistência ao cisalhamento dos solos em função da densidade do solo.

A relação entre resistência ao cisalhamento dos solos e a sua umidade correspondente à tensão de 0,01MPa está apresentada na figura 2.4. Observa-se, para as diferentes classes de solos que, à medida em que a umidade correspondente a 0,01 MPa aumentou, a resistência ao cisalhamento também aumentou. Neste caso a maior densidade (Tabela 2.1) reflete a estrutura mais compacta, com maior quantidade de poros capilares que corresponde a um

aumento das tensões capilares ao conferir maior estabilidade à estrutura dos solos (Azevedo, 1999).

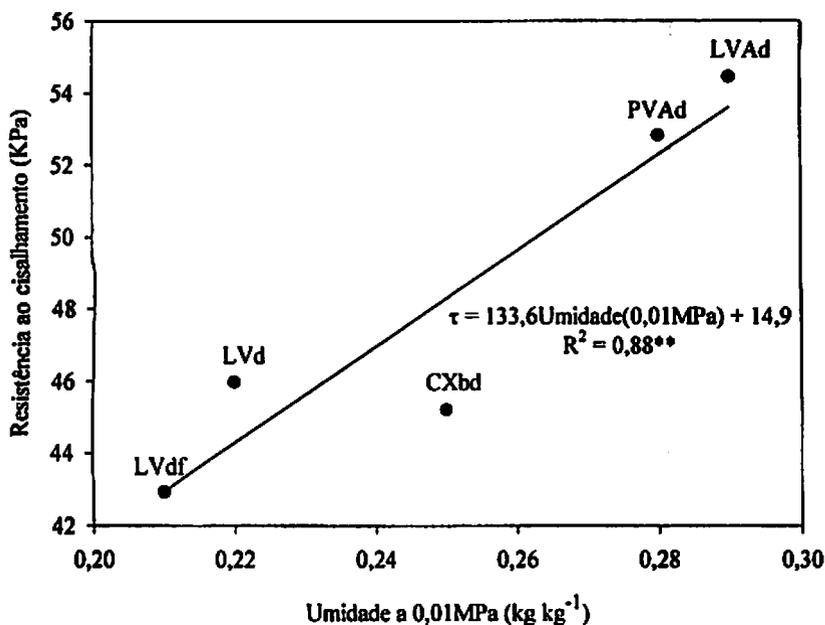


Figura 2.4. Relação entre resistência ao cisalhamento dos solos e umidade dos solos à tensão de 0,01MPa.

Plotando-se resistência ao cisalhamento, em função da quantidade de areia dos solos estudados (Figura 2.5), observa-se um aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da quantidade de areia. Isto é devido à capacidade de as partículas de areia se rearranjarem de maneira mais densa (Dias Junior & Miranda, 2000), provocando maior densidade do solo (figura 2.3), maior atrito e, conseqüentemente, maior resistência ao cisalhamento. Os solos LVd, CXbd e LVdf, com maiores quantidades de argila (Figura 2.6), apresentaram menores densidades do solo, menores umidades a 0,01MPa (Tabela 2.1) e menores resistências ao cisalhamento. O fato de a argila proporcionar menor resistência ao cisalhamento do solo está também relacionado à mineralogia do solo (Terzaghi et al., 1997) e, de certa forma, é influenciada pela adsorção e

dessorção de íons que podem diminuir a agregação do solo. Segundo Silva et al. (1993), nos solos LVd e LVdf, predomina a gibbsita e nos solos PVAd, LVAd e CXbd, predomina, entre outros minerais, a caulinita.

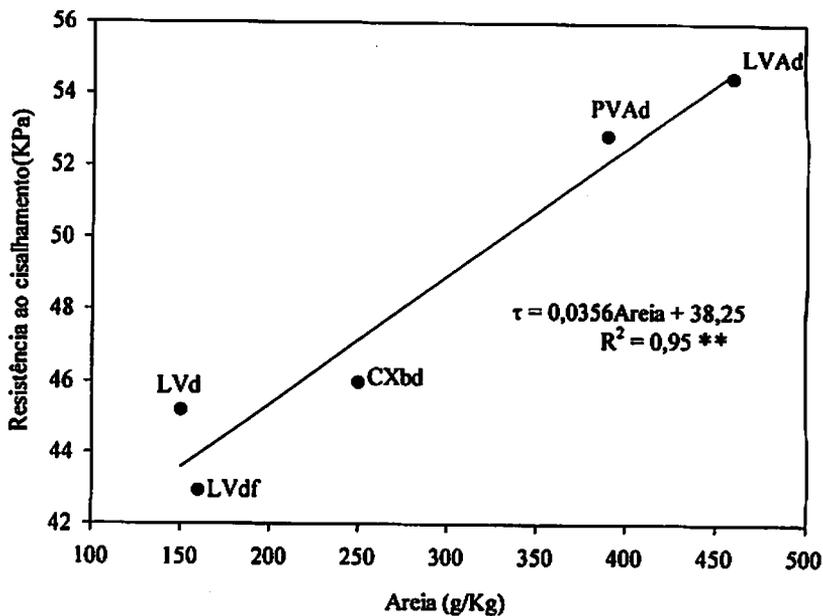


Figura 2.5. Relação entre resistência ao cisalhamento e a quantidade de areia dos Solos.

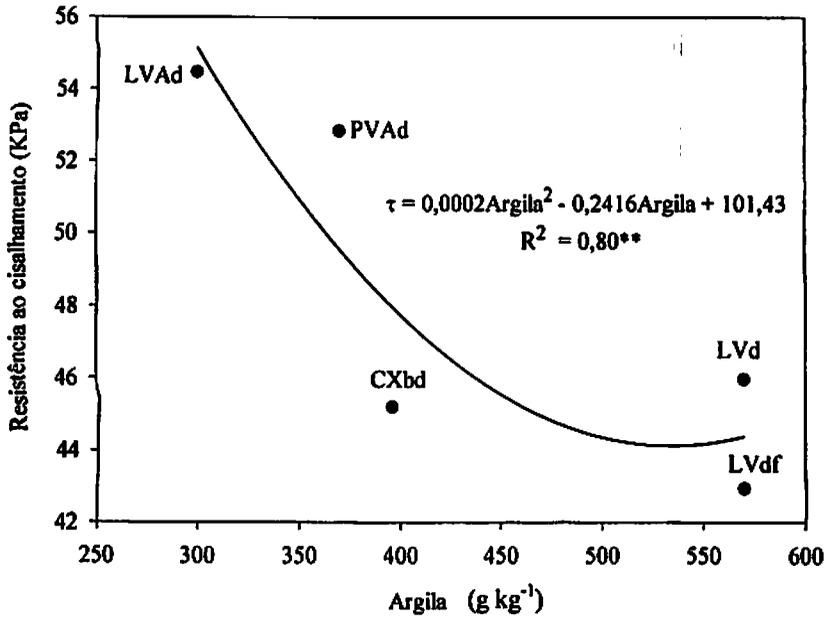


Figura 2.6. Relação entre resistência ao cisalhamento com a quantidade de argila dos solos.

Os solos com maiores teores de matéria orgânica (Tabela 2.2) apresentaram também menores densidades do solo (Tabela 2.1). Neste caso, a matéria orgânica, embora seja um agente cimentante que promove agregação no solo, reduz o contato entre as partículas e, conseqüentemente o atrito no solo, acarretando menor resistência ao cisalhamento (Figura 2.7). Esses resultados corroboram aqueles encontrados por Ohu et al. (1986).

Tabela 2.2. Teor de matéria orgânica e relações moleculares Ki e Kr, dos cinco solos estudados.

Classe de Solo	Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	Ki	Kr
LVdf	18,6	0,89	0,58
LVd	21	0,91	0,71
LVAd	8,8	1,02	0,92
PVAd	9,5	1,52	1,28
CXbd	21,8	1,60	1,43

Ki = SiO₂/Al₂O₃ e Kr = SiO₂/Al₂O₃ + Fe₂O₃

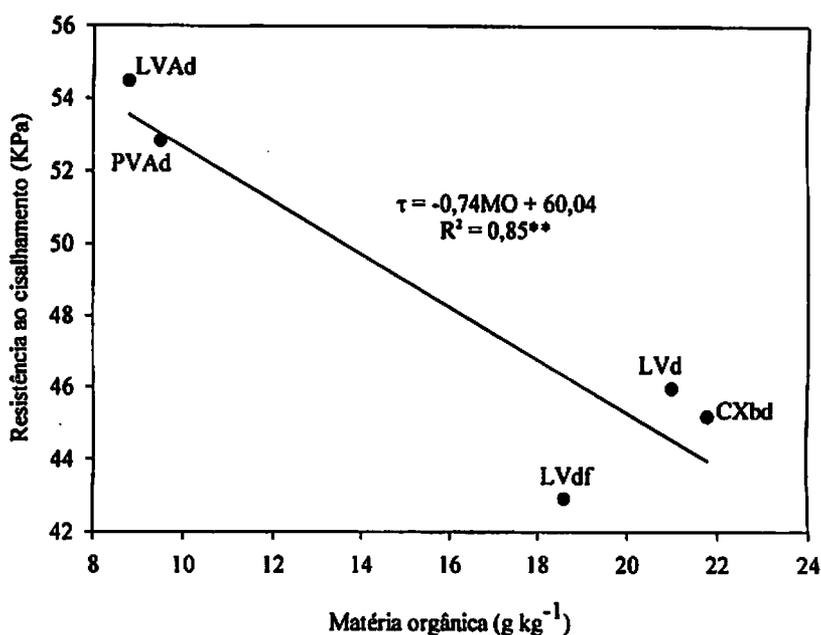


Figura 2.7. Relação entre resistência ao cisalhamento e o teor matéria orgânica do solos

As figuras 2.8 e 2.9 relacionam a resistência ao cisalhamento dos solos estudados com os índices de intemperismo K_i e K_r dos solos, (Tabela 2.2). Observa-se que, para uma condição de solo mais jovem, como é o caso do CXbd, a resistência ao cisalhamento dos solos é baixa.

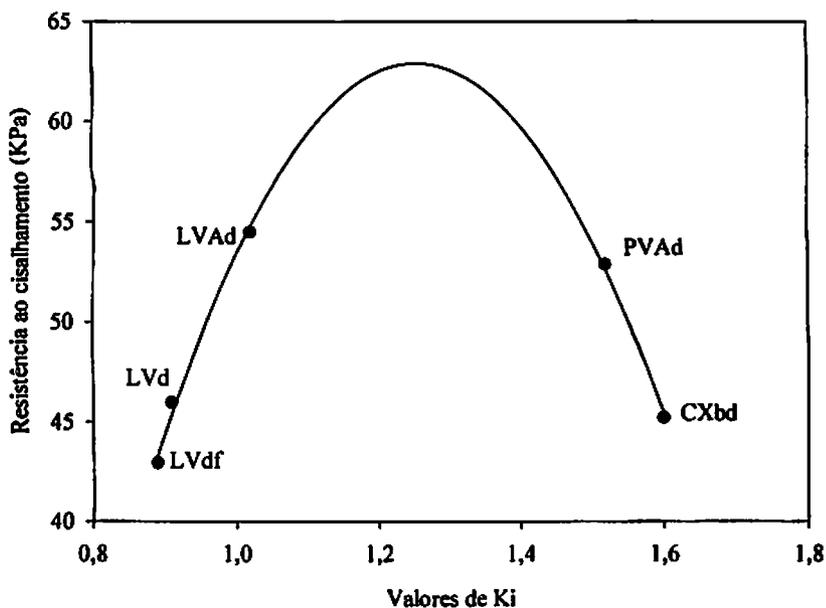


Figura 2.8. Relação entre resistência ao cisalhamento e o índice K_i dos solos.

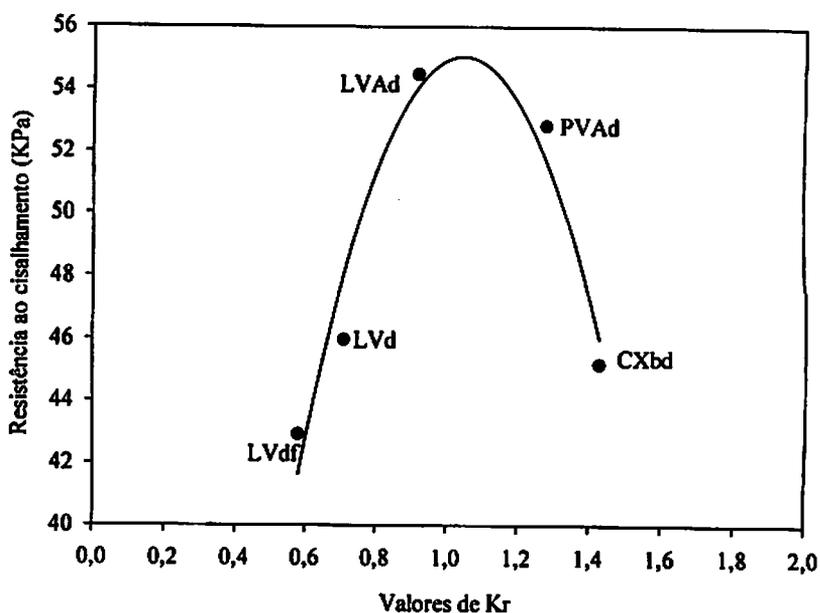


Figura 2.9. Relação entre resistência ao cisalhamento e o índice Kr dos solos.

Solos em estado mais jovem de desenvolvimento, (CXbd), que apresentam maiores valores de K_i e K_r (Tabela 2.2) e maiores quantidades de silte (Tabela 2.1), podem apresentar menor grau de estruturação, com conseqüente redução do contato entre as partículas e menores forças de atrito atuantes sobre este solo. Já para o PVAd, solo com horizonte B textural, por apresentar uma estrutura em blocos, de forma geral, pode apresentar maior contato entre as partículas, que lhe confere maior resistência ao cisalhamento.

Nos Latossolos, solos mais intemperizados, observa-se que, à medida em que há redução de K_i e K_r , há também redução nos valores de resistência ao cisalhamento, na seqüência $LVAd > LVd > LVdf$. O desenvolvimento da estrutura granular, do LVd para o LVdf, condiciona o menor atrito entre as partículas, conferindo menor resistência ao cisalhamento.



4 CONCLUSÕES

1. Os solos LVAd e PVAd, com maiores densidades do solo, quantidades de areia e umidade na tensão de 0,01MPa maiores, apresentaram maior resistência ao cisalhamento em relação ao LVd, CXbd e LVdf, que apresentaram maiores quantidades de argila e de matéria orgânica.

2. A coesão aparente, de forma geral, foi maior para solos com maiores: densidade do solo, umidade na tensão de 0,01MPa e quantidade de areia.

3. Para a classe dos Latossolos, a resistência ao cisalhamento diminuiu com a redução dos índices Ki e Kr.

4. A estrutura em blocos condiciona maior resistência ao cisalhamento aos solos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYERS, P. D.; PERUMPRAL, J. V. Moisture and density effect on cone index. **Transactions of the American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 25, n. 5, p. 1169-1172, Sept./Oct. 1982.

AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa - MG**. 1999. 169 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BENJAMIN, J. G.; CRUSE, R. M. Measurement of shear strength and bulk density of soil aggregates. **Soil Science Society of the American Journal**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1248-1251, Sept./Oct. 1985.

BENJAMIN, J. G.; CRUSE, R. M. Tillage effects on shear strength and bulk density of soil aggregates. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 9, n. 3, p. 255-263, May 1986.

CRUSE, R. M.; LARSON, W. E. Effects of soil shear strength on soil detachment due to rain drop impact. **Soil Science Society of the American Journal**, Madison, v. 41, n. 4, p. 777-781, July/Aug. 1977.

- ✕ **CURI, N.; LIMA, J. M.; ANDRADE, H.; GUALBERTO, V.** Geomorfologia, física, química e mineralogia dos principais solos da região de Lavras, MG. *Ciência e Prática*, Lavras, v. 14, n. 3, p. 297-307, set./dez. 1990.
- DAVIES, P.** Influence of organic matter, moisture status and time after reworking on soil shear strength. *Soil Science Society of the American Journal*, Madison, v. 36, n. 2, p. 299-306, Mar./Apr. 1985.
- ✕ **DIAS, J. M. S.; MIRANDA, E. E. V.** Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras - MG. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 24, n. 2, p. 337-346, abr./jun. 2000.
- EKWUE, E. J.; STONE, R. J.** Organic matter effects on the strength properties of impacted agricultural soils. *Transactions of American Science Agricultural Engineering*, St. Joseph, v. 38, n. 2, p. 357-365, Mar./Feb. 1995.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.** Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- GANTZER, C. J.; BUYANOVSKY, G. A.; ALBERTS, E.; REMLEY, P. A.** Effects of soybean and crop residue deposition on soil strength and splash detachment. *Soil Science Society of the American Journal*, Madison, v. 51, n. 1, p. 202-206, Jan./Feb. 1987.
- OHU, O. J.; RAGHAVAN, G. S. V.; McKYES, E.; MEHUYS, G.** Shear strength prediction of soils with varying added organic matter contents. *Transactions of American Science Agricultural Engineering*, St. Joseph, v. 29, n. 2, p. 351-355, Mar./Apr. 1986.
- ORTIGÃO, J. A. R.** **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995. v.1. 374p.
- PINTO, C. S.** **Resistência ao cisalhamento dos solos.** São Carlos: Grêmio Politécnico, 1989. v. 1, 127 p
- SCHJONNING, P.** Soil strength as influenced by texture, water content and soil management. *Soil Tillage Research*, Amsterdam, v. 12, n. 3, p. 277-283, Oct. 1991.
- SILVA, A. C.** **Relação entre voçorocas e solos na região de Lavras-MG.** 1990. 124 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

SILVA, A. C.; LIMA, J. M.; CURI, N. Relações entre voçorocas, uso da terra, solo e materiais de origem da região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 459-464, 1993.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Cimes: Iowa State University, 1989. 161 p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3. ed. New York: John Wiley, 1997. 549 p.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1989. 509 p.

CAPÍTULO 3

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS COM INCIDÊNCIA DE VOÇOROCAS NA REGIÃO DE LAVRAS, MG.

RESUMO

A região de Lavras apresenta grande incidência de voçorocas em diferentes classes de solos, voçorocas essas que agridem a paisagem local e colocam em risco a vida de pessoas e animais. O conhecimento dos parâmetros da resistência ao cisalhamento dos solos torna-se fundamental para a proposição de técnicas de estabilização para posterior recuperação dessas voçorocas. Baseado nisso este estudo teve como objetivo quantificar a resistência ao cisalhamento dos diferentes horizontes dos solos: Latossolo Vermelho Amarelo (LVAd), Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Cambissolo distrófico (CXBd), todos os solos em estágio avançado de voçorocamento. Realizaram-se ensaios de cisalhamento direto nos horizontes A, B e C desses solos, todos na umidade de saturação. O Cambissolo por apresentar expressiva xistosidade, os ensaios foram realizados em dois sentidos, sendo o CXBd1 caracterizado pelo ensaio no sentido da xistosidade e CXBd2 caracterizado pelo ensaio no sentido transversal a xistosidade. Os resultados mostraram que, no geral, o CXBd2 se mostrou a classe de solo mais resistente entre as estudadas, seguido pelo LVAd, LVdf e CXBd1. Isto demonstra que, em sentido transversal, a xistosidade quanto da aplicação das forças cisalhantes, confere ao solo uma maior resistência ao voçorocamento. O LVAd, com maiores quantidades de caulinita, quando comparado com LVdf, e maiores teores de matéria orgânica, apresenta uma estrutura tendendo para blocos que, por sua vez, torna o LVAd um solo também mais resistente ao voçorocamento. O LVdf, com menor relação Caulinita/(caulinita + gibbissita), característica que confere a este solo uma estrutura granular com reduzida área de contato entre as partículas, colocando esse solo como um dos solos com menor resistência ao cisalhamento e um alto potencial para o desenvolvimento de voçorocas. O CXBd1, foi o solo que apresentou a menor resistência ao cisalhamento, fato esse que pode estar associado à pouca espessura do solum, maior quantidade de silte e à aplicação das forças cisalhantes no sentido longitudinal da xistosidade. O horizonte A de todos os solos se mostrou mais resistente, principalmente em função do maior teor de matéria orgânica, seguido pelo horizonte B e C nessa ordem. Daí conclui-se que a xistosidade, quando se encontra no sentido transversal às forças cisalhantes, à estrutura em blocos, aumenta a resistência do solo ao voçorocamento. Em contrapartida, a maior quantidade de silte, a xistosidade quando se encontra no sentido longitudinal às forças cisalhantes, à estrutura granular e o menor teor de matéria orgânica, tornam os solos menos resistentes ao cisalhamento.

ABSTRACT

SHEAR STRENGTH OF SOILS WITH INCIDENCE OF GULLIES EROSION IN LAVRAS, MG, REGION.

The Lavras region presents great gully erosion incidence in different soil classes, which attack the local landscape and place in risk the people and animal's lives. The knowledge of the soil shear strength parameters becomes fundamental for slope stabilization techniques and subsequent gullies erosion recovery. Based on that, this study had as an objective to quantify the shear strength of different horizons of the Red-Yellow Latosol (LVAd), distroferic Red Latosol (LVdf) and Inceptsoil (CXBd), all of them in advanced stadium of gully erosion. The shear strength tests were done in saturated soil samples of the A, B and C-horizons. Due to the xistosity of the Inceptsoil, the tests were accomplished in two directions, being CXBd1 characterized by the test done in the longitudinal xistosity direction and CXBd2 characterized by the test done in the traverse xistosity direction. In general, the CXBd2 was the soil class more resistant among the studied soils, followed by LVAd, LVdf and CXBd1. This demonstrates that, when the application of the shear forces was in the xistosity traverse direction, it confer to the soil a larger resistance to the gully erosion. The LVAd, with larger amounts of kaolinit than the LVdf, and with larger organic matter content and with block structure turns the LVAd a soil more resistant to the gully erosion. The LVdf, with smaller relationship kaolinit / (kaolinit + gibbsite), characteristic that confer to this soil a granular structure with reduced particles contact area, turns this soil as one of the soil with smaller shear strength and a high potential for the development of gully erosion. The CXBd1, presented the smallest shear strength, fact that can be associated to the little thickness of the A + B horizons, larger amount of silt and to the application of the shear forces in the longitudinal xistosity direction. The A horizon of all soils was more resistant, mainly as a function of the largest organic matter content, followed by the B and C horizons in this order. It was concluded that when the xistosity is in the traverse direction to the shear forces, and the soil structure is blocks, it increases the soil resistance to the gully erosion. In contrast, the largest amount of silt, the xistosity in the longitudinal direction to the shear forces, the granular structure and the smallest organic matter content, turns the soil less resistant soils to the shear.

1 INTRODUÇÃO

Com a expansão das fronteiras agrícolas mundiais, tornaram-se necessários maiores investimentos no setor agrícola, e um dos que mais se desenvolveu foi o de máquinas e implementos agrícolas. Entretanto, este desenvolvimento não veio acompanhado na mesma velocidade pelas pesquisas em técnicas de correta utilização destes equipamentos, ficando falha também a educação ambiental do agricultor quanto ao uso adequado dessas máquinas, principalmente no aspecto de minimizar seus efeitos danosos sobre o solo. Na conscientização desse problema e na necessidade de amenizá-los, técnicas têm sido utilizadas com sucesso, como a proposta por Dias Júnior (1994); Dias Júnior & Pierce (1996); Kondo & Dias Junior (1998), Silva & Dias Junior (2002), técnicas essas que utilizam a pressão de preconsolidação como estimativa da capacidade suporte de cargas do solo de solos parcialmente saturados.

Apesar do avanço representado por estes estudos, nenhum deles leva em consideração a resistência do solo ao cisalhamento que é uma propriedade do solo de fundamental importância em estudos que levam em consideração a patinagem dos rodados bem como em estudos de erosão do solo.

↙ A resistência ao cisalhamento de um solo é a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, a qual é representada pela tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura ocorre. Qualquer problema de ruptura em Mecânica de Solos envolve, portanto, uma superfície de ruptura, que pode ser definida a priori como sendo aquela em cujos pontos, a tensão de cisalhamento atinge o valor limite de sua resistência, a qual pode ser expressa pela equação de Coulomb (Ramamurthy, 2001).

$$\tau = c + \sigma n \operatorname{tg}\phi \quad (1)$$

em que τ é a máxima tensão cisalhante suportada pelo solo, σ_n é a tensão normal a que a superfície de falhamento está submetida, c é o intercepto de coesão ou coesão aparente do solo, e ϕ é o ângulo de atrito interno do solo, definido como sendo o ângulo que a força normal faz com a resultante das forças a que o maciço terroso está submetido. Esta equação define a envoltória de resistência (Figura 3.1), que é a linha limite de resistência dos solos, ou seja, qualquer tensão cisalhante que esteja acima desta linha promoverá a ruptura do solo. Os parâmetros c e ϕ são características intrínsecas dos solos (Benjaminim & Cruse, 1985; Ramamurthy, 2001; Zang et al., 2001) e, se σ_n é nulo, a expressão $\sigma_n \operatorname{tg}\phi$ será nula e a resistência ao cisalhamento do solo será dependente apenas do intercepto de coesão.

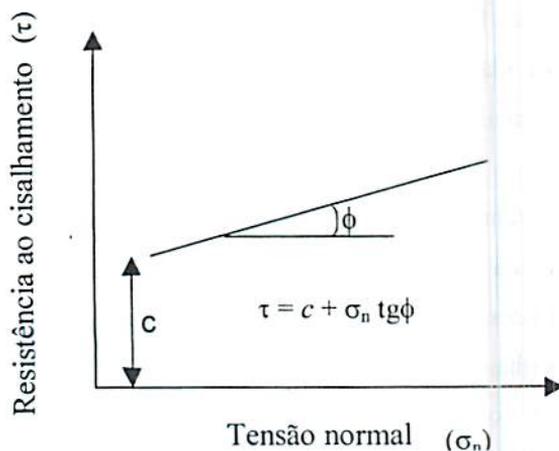


Figura 3.1. Envoltória de resistência, definida como a relação linear entre tensão normal e de cisalhamento.

Nesse estudo, a coesão determinada é a coesão aparente ou intercepto de coesão (c). Este parâmetro é uma parcela da resistência ao cisalhamento dos solos presente apenas em solos parcialmente saturados em consequência da maior ou menor tensão capilar (Pinto, 1989; Vargas, 1989; Azevedo, 1999).

Saturando-se ou secando-se o solo totalmente, este parâmetro desaparece, donde o nome de aparente.

A coesão aparente do solo será tanto maior quanto maior for a proximidade das partículas desse solo (Pinto, 1989). Para maiores densidades do solo, este parâmetro da resistência ao cisalhamento será também maior, desde que o solo não contenha quantidades expressivas de silte (Rocha et al., 2001). Em estudos de resistência ao cisalhamento e mecanização agrícola, correlações positivas com a resistência do solo à penetração, densidade do solo já foram obtidas tanto para uma como para várias passadas de tratores na mesma linha de tráfego (Servadio et al., 2001; Zang et al., 2001), sendo que os valores de resistência ao cisalhamento do solo aumentaram com o aumento do número de passadas dos tratores. Portanto, modelos baseados na resistência ao cisalhamento do solo podem ser elaborados na previsão da capacidade suporte de cargas do solo, uma vez que análises de tensões-deformações podem ser obtidas nesse tipo de ensaio.

Para Sidorchuk et al. (2003), a umidade e teor de matéria orgânica, podem influenciar na resistência ao cisalhamento do solo, de forma que, para determinados valores de umidade, a matéria orgânica tende a reduzir a resistência ao cisalhamento, em função da menor densidade do solo conferida por esta, reduzindo com isto o contato entre as partículas, que acarreta menores resistências ao cisalhamento. Por outro lado, também dependendo da umidade, a matéria orgânica presente no solo exerce funções físico químicas, tais como um melhor desenvolvimento radicular, uma melhor estruturação do solo que também conferem resistência ao cisalhamento do solo. Assim, a resistência ao cisalhamento dos solos é um parâmetro importante na caracterização das alterações da estrutura do solo, (Cruse & Larson, 1977; Davies, 1985; Gantzer et al., 1987; Sevadío et al., 2001).

Um dos poucos estudos relacionando resistência ao cisalhamento e mineralogia dos solos foi realizado por Rocha et al. (2001) em quatro solos da região de Lavras (MG). Observou-se neste estudo que, de uma maneira geral, os solos que apresentaram uma maior relação caulinita/gibbsita, com menores teores de óxidos de ferro, apresentaram também estruturas em blocos e maiores resistências ao cisalhamento. Em contrapartida, solos nos quais o predomínio é de gibbsita, com maiores teores de óxidos de ferro o que confere a estes solos estrutura granular, acarretando menores áreas de contato entre agregados e menores resistências ao cisalhamento e, portanto, desde que as condições de relevo e condutividade hidráulica permitam, estes solos serão mais suscetíveis ao voçorocamento natural. Baixas resistências ao cisalhamento do solo também foram encontradas por Scholten (1999) para saprólitos. O principal motivo está relacionado à ausência de matéria orgânica e à maior quantidade de silte. Estas observações sugerem que a resistência ao cisalhamento do solo possa ser usada como uma medida da estabilidade da estrutura do solo e indicativo de susceptibilidade ao voçorocamento.

Com relação à textura, solos com maiores quantidades de areia apresentarão maiores resistências ao cisalhamento (Rocha et al., 2002), devido à capacidade dessas partículas de se rearranjarem de uma maneira mais densa quando submetidas a esforços externos conferindo maior densidade aos solos (Dias Júnior & Miranda, 2000), o que gera maior atrito entre as partículas e aumenta a resistência ao cisalhamento do solo. No caso de solos argilosos, o estudo da resistência ao cisalhamento torna-se mais complexo, pelo fato desta fração ser a mais ativa do solo, e os processos físicos e químicos tais como sucessivas arações e gradagem, flutuação do lençol freático, através de drenagens, adubações fosfatadas e calagem, que atuam no sentido de aumentar ou reduzir o contato entre partículas do solo, conseqüentemente, aumentarão ou reduzirão a resistência ao cisalhamento do solo. Terzaghi et al., (1997), também

em estudos dessa natureza, encontraram para uma pressão normal de 300kPa aplicada a um solo caulínico, uma resistência ao cisalhamento de 150kPa e, para um solo com expressivos teores de montmorilonita contendo sódio, para a mesma pressão normal, a resistência ao cisalhamento foi de 33 kPa. Esta diferença, segundo estes autores, deu-se principalmente pela menor porosidade e índices de vazios apresentados pelo solo caulínico, o que aumenta a área de contato entre as partículas, aumentando assim sua resistência ao cisalhamento. Por outro lado, o sódio pode ter agido com agente dispersante, aumentou os espaços vazios e, reduziu a área de contato das partículas e sua resistência ao cisalhamento.

Assim, os objetivos deste estudo foram: a) verificar a resistência ao cisalhamento de taludes naturais de voçorocas formadas em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; Latossolo Vermelho Distrófico e Cambissolo Háptico Tb distrófico. b) associar a resistência ao cisalhamento desses solos com suas características físicas e químicas e c) verificar a contribuição de cada horizonte na resistência ao cisalhamento desses solos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Solos

Este estudo foi realizado em voçorocas localizadas na região de Lavras, MG e nas seguintes classes de solos: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) A moderado, textura argilosa; Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) A moderado, textura argilosa; Cambissolo Háptico Tb distrófico típico (CXbd) A moderado, textura média.

2.2 Ensaio de Cisalhamento

Foram coletadas 120 amostras em cada classe de solo, perfazendo um total de 480 as quais foram coletadas em amostradores especialmente desenvolvidos para ensaios de cisalhamento direto (Rocha et al., 2002). A coleta se deu em esquema de malhas, com distâncias variando de 0,5m a 16m entre conjunto de quatro amostras (Figura 3.2) na direção horizontal e variando de 0,3 a 3,5m na profundidade dos solos. Entre cada sentido amostral, foi respeitada uma distância mínima de 0,1m, as distâncias entre os conjuntos de amostras foram estabelecidas para que os horizontes A, B e C pudessem ser incluídos nas análises.

O Cambissolo foi ensaiado em função da xistosidade: CXBd1 sentido longitudinal da xistosidade, CXBd2 sentido transversal da xistosidade (Tabela 1). As amostras foram coletadas em lados opostos na mesma voçoroca.

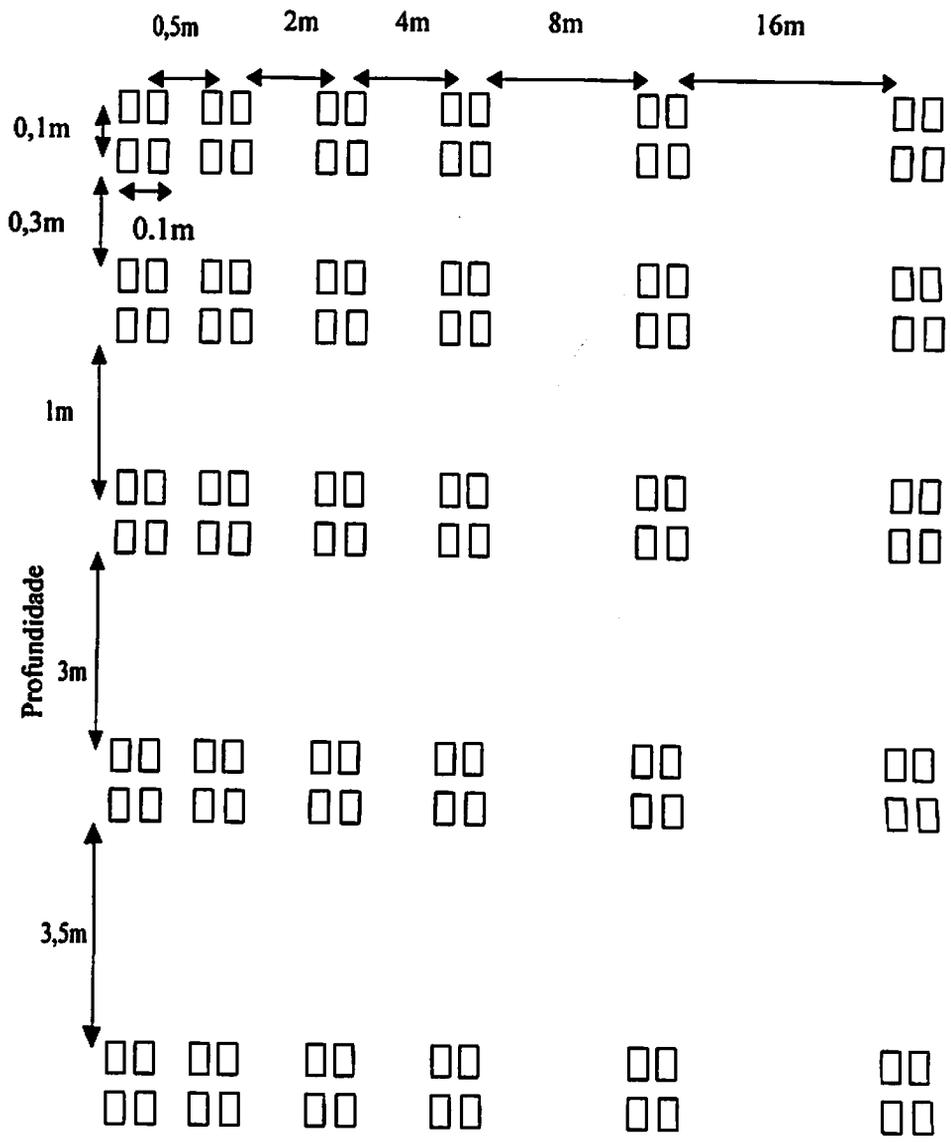


Figura 3.2. Esquema de amostragem para o ensaio de cisalhamento direto.

2.3 Preparo das amostras

As amostras de solo, antes de serem submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, foram saturadas e colocadas em papel filtro por alguns segundos para a retirada do excesso de água. Este estudo se desenvolveu com os solos saturados, dado ao fato de que, na saturação, as tensões capilares dos solos são reduzidas, diminuindo também sua resistência ao cisalhamento (Terzaghi, 1997) que, conseqüentemente, torna essa condição de umidade do solo a mais crítica para a estabilidade de taludes de terra, a exemplo dos barrancos de voçorocas.

2.4 Ensaio de Cisalhamento Direto

Utilizou-se, no ensaio de cisalhamento direto, uma prensa de cisalhamento fabricada pela ELE International (Digital Shear Machine, 26-112 - 9901X0089) (Figura 1.2). O equipamento operou com velocidade de deslocamento horizontal de $3,33 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ e tensões normais de 14, 42, 70 e 97 kPa. A calibração da prensa de cisalhamento foi realizada conforme descrito no capítulo 1.

2.5 Determinações físico-químicas das amostras de solo

2.5.1 Análise Textural

Na obtenção das quantidades das frações areia, silte e argila, utilizou-se a dispersão química e mecânica e o método da pipeta (Day, 1965).

2.5.2 Densidade do solo

A densidade do solo foi obtida pelo método do anel volumétrico conforme Blake & Hartge (1986a).

2.5.3 Densidade de partículas

A densidade de partículas foi obtida pelo método do picnômetro (Blake & Hartge, 1986b).

2.5.4 Mineralogia

Para as análises mineralógicas, separou-se a fração argila dos solos pelo processo de sedimentação, seguindo a lei de Stokes, controlando-se o pH da suspensão entre 4 e 8 pela adição de HCL e NaOH. A fração da suspensão, contendo argila congelada e liofilizada, foi em seguida triturada e peneirada em peneira com malha de 0,5mm. Esse material foi submetido à desferrificação seguindo a metodologia de Mehra & Jackson (1960). A quantificação da caulinita e gibbsita da fração argila desferrificada foi feita por análise térmica diferencial (ATD).

2.6 Matéria Orgânica

Os teores de matéria orgânica das amostras foram determinados de acordo com Defelipo & Ribeiro (1981).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentadas as Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 com as análises de caracterização dos solos estudados.

Tabela 3.1. Análise textural para os horizontes A, B e C do CXBd1, CXBd2, LVd e LVAd.

Classe de solo	Areia (g kg ⁻¹)			Silte (g kg ⁻¹)			Argila (g kg ⁻¹)		
	Horizontes			Horizontes			Horizontes		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CXBd1	143	123	228	562	584	589	295	293	183
CXBd2	152	141	234	512	545	605	336	314	161
LVd	142	133	172	319	260	402	539	608	426
LVAd	193	202	237	251	209	440	556	589	323

Tabela 3.2. Mineralogia, teores de Fe₂O₃ e Matéria Orgânica para as classes de solos do CXBd1, CXBd2, LVd e LVAd.

Classe de solo	Gibbsita (g kg ⁻¹)	Caulinita (g kg ⁻¹)	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	Ct/(Ct +Gb)	Matéria Orgânica (dag/kg)			
						A	B	C
	CXBd1	98,75	199,00	112,00	0,67	3,7	2,2	0,5
CXBd2	121,24	282,62	110,00	0,70	4,1	2,4	0,7	
LVd	541,92	200,43	125,00	0,27	2,2	1,7	0,7	
LVAd	380,00	300,10	67,60	0,44	3,8	2,7	0,8	

TABELA 3.3. Densidade de partículas e do solo das classes de solos CXBd1, CXBd2, LVd e LVAd.

Classe de solo	Densidade de Partículas (g kg ⁻¹)			Densidade do solo (g kg ⁻¹)		
	A	B	C	A	B	C
	CXBd1	2,71	2,73	2,75	0,90	1,08
CXBd2	2,70	2,73	2,75	0,90	1,05	1,13
LVd	2,66	2,68	2,72	0,92	0,98	1,02
LVAd	2,53	2,52	2,53	0,93	1,12	1,13

3.1 Envoltórias de resistência ao cisalhamento para os horizontes A, B e C para cada classe de solo estudada.

3.1.1 CXBd1

Os horizontes A, B e C se comportaram de maneira diferente com relação à resistência ao cisalhamento conforme demonstrado pelo teste de Snedecor & Cochran (1989) (Tabela 3.4).

TABELA 3.4. Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes A, B, C e A + B para o CXBd1, utilizando o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Horizontes	Parâmetros do modelo		
	F	Coefficiente angular	Intercepto de coesão
A x B	ns	Ns	ns
A x C	*	*	*
B x C	*	*	*
A + B x C	*	*	*

Observa-se, no entanto, que o horizonte A foi o que apresentou maior resistência, seguido pelo horizonte B e por conseguinte o horizonte C (Figura 3.3).

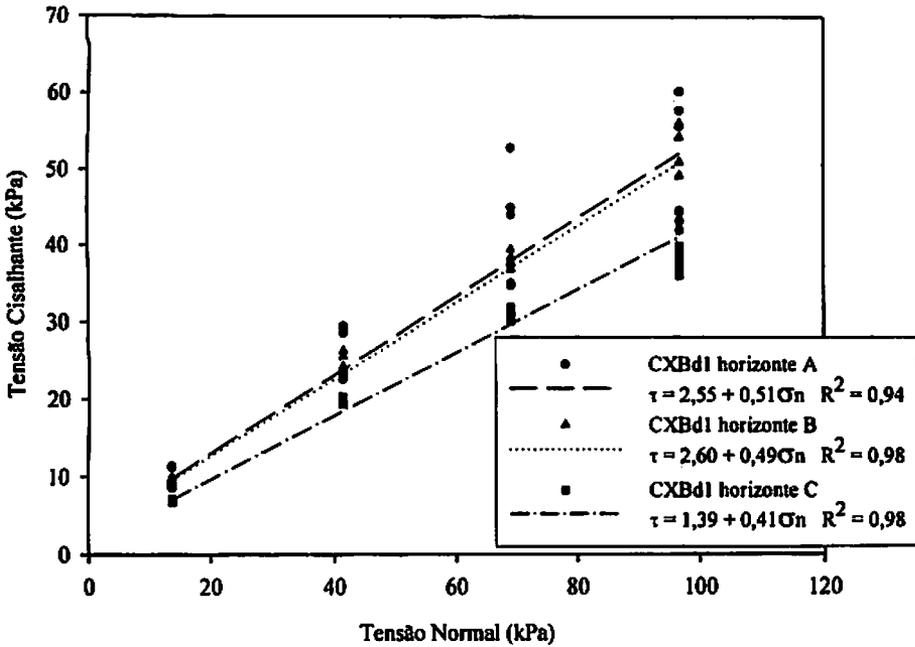


Figura 3.3. Envoltória de resistência dos horizontes A, B e C para o CXBd1.

Como os horizontes A e B não diferiram estatisticamente (Tabela 3.4), os pares de valores de tensões normais e tensões cisalhantes desses dois horizontes foram agrupados e uma nova envoltória de resistência foi obtida (Figura 3.4). Nessa figura, observa-se que o solum A+B se mostrou mais resistente ao cisalhamento que o horizonte C.

Essa maior resistência apresentada pelos horizontes A+B é, * possivelmente, devido a um maior conteúdo matéria orgânica presente principalmente no horizonte A (Tabela 3.2), matéria orgânica essa que pode estar agindo como agente agregador do solo (Tisdall & Oades, 1982), conferindo maior resistência ao cisalhamento. O horizonte C, por sua vez, com maiores quantidades de silte (Tabela 3.1) não apresenta uma boa estruturação, ao que se deve à menor resistência. Baixas resistências ao cisalhamento do solo também foram encontradas por Scholten (1999) para saprólitos, onde o principal motivo

está relacionado à ausência de matéria orgânica, à maior quantidade de silte e falta de agregação.

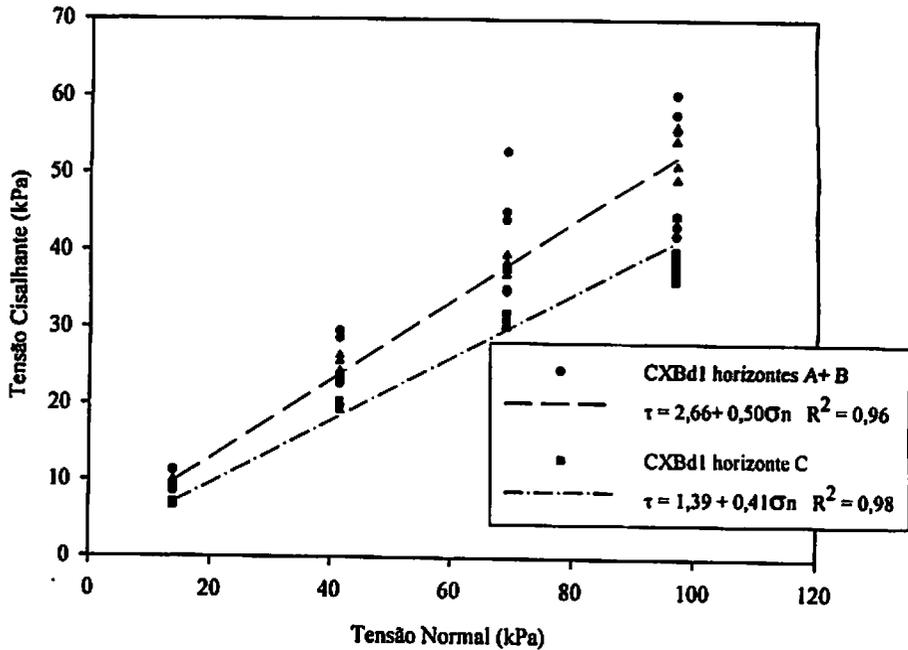


Figura 3.4. Envoltória de resistência dos horizontes A+ B e C para o CXBd1.

3.1.2 LVd

Este Latossolo, por apresentar uma condição mais homogênea entre os horizontes A e B, principalmente quando se trata da quantidade de areia (Tabela 3.1) e densidade do solo (Tabela 3.3), não apresentou diferença estatística entre esses dois horizontes (Tabela 3.5). Também o pouco conteúdo de matéria orgânica, presente no horizonte A (Tabela 3.2), não parece ter sido suficiente para promover uma diferenciação estrutural entre horizontes A e B em conjunto

a ponto de refletir em diferenças na resistência ao cisalhamento. Já os horizontes A e B foram diferentes do horizonte C, o qual apresentou a menor resistência ao cisalhamento (Figura 3.5).

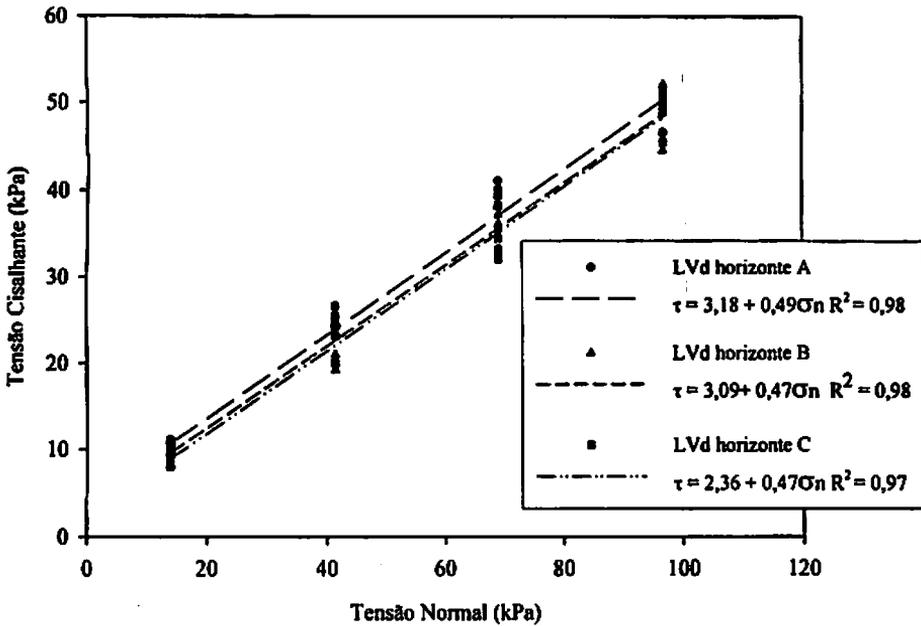


Figura 3.5. Envoltória de resistência dos horizontes A, B e C para o LVd
TABELA 3.5. Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes A, B e C para o LVd, utilizando o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Horizontes	Parâmetros do modelo		
	F	Coefficiente angular	Intercepto de coesão
A x B	ns	ns	ns
A x C	ns	ns	*
B x C	ns	ns	*
A+B x C	*	ns	*

Uma vez não observada diferença estatística entre os horizontes A e B, os valores das tensões normais e tensões cisalhantes foram agrupados e uma nova envoltória (Figura 3.6) e (Tabela 3.5). Esta nova envoltória, que reúne os horizontes A e B, foi comparada com a do horizonte C, obtendo-se este horizonte com menor resistência ao cisalhamento, fato esse explicado pela sua maior quantidade de silte (Tabela 3.1) em relação aos demais horizontes e menor quantidade de matéria orgânica (Tabela 3.2). Constata-se então para o LVd, que a estrutura granular é mais resistente ao cisalhamento que a maciça que caracteriza o horizonte C.

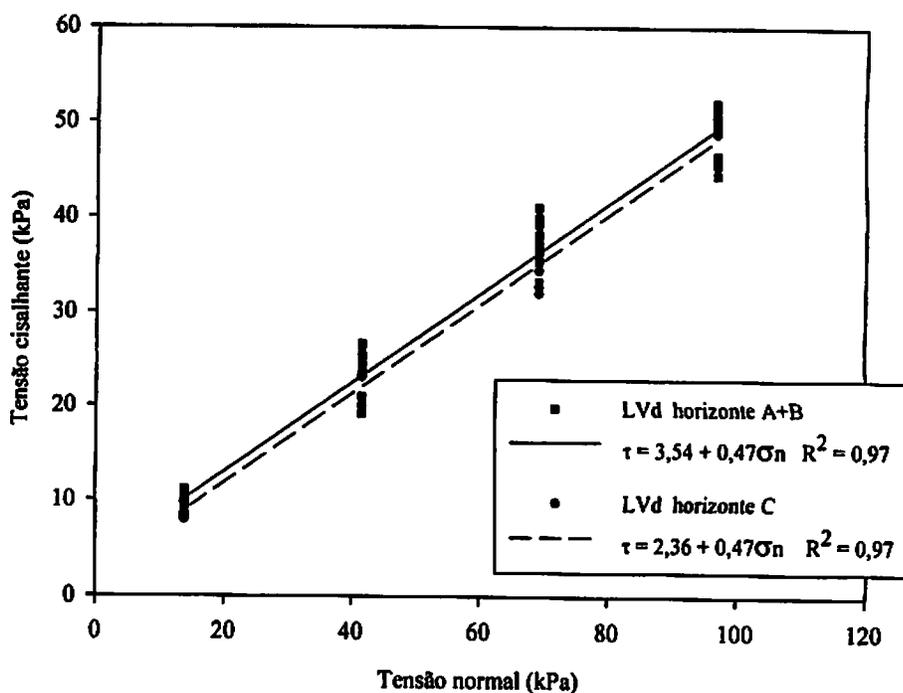


Figura 3.6. Envoltória de resistência dos horizontes A + B e C para o LVd

3.1.3 LVAd

Neste Latossolo, o horizonte A apresenta maior resistência ao cisalhamento que os demais horizontes (Figura 3.7). Todos os horizontes foram diferentes estatisticamente pelo teste de Snedecor & Cochran (1989), conforme mostra a tabela 3.6. O conteúdo de matéria orgânica e a estrutura em blocos são preponderantes para essa maior resistência ao cisalhamento e também um emaranhado de raízes de gramíneas que ali se desenvolveram podem ter contribuído para essa maior resistência, fato esse que concorda com o observado por Jastrow et al. (1998), que atribui este bom desenvolvimento radicular a uma condição mais favorável física e química favorecida pela matéria orgânica. A ordem decrescente de resistência ao cisalhamento para os horizontes do LVAd foram: A>B>C. O Horizonte B por sua vez apresentou uma estrutura tendendo para blocos e, de certa forma, o torna mais resistente que o horizonte C que apresenta uma estrutura em forma de maciço poroso devido a sua maior quantidade de silte (Tabela 3.1), reduzindo sua resistência ao cisalhamento.

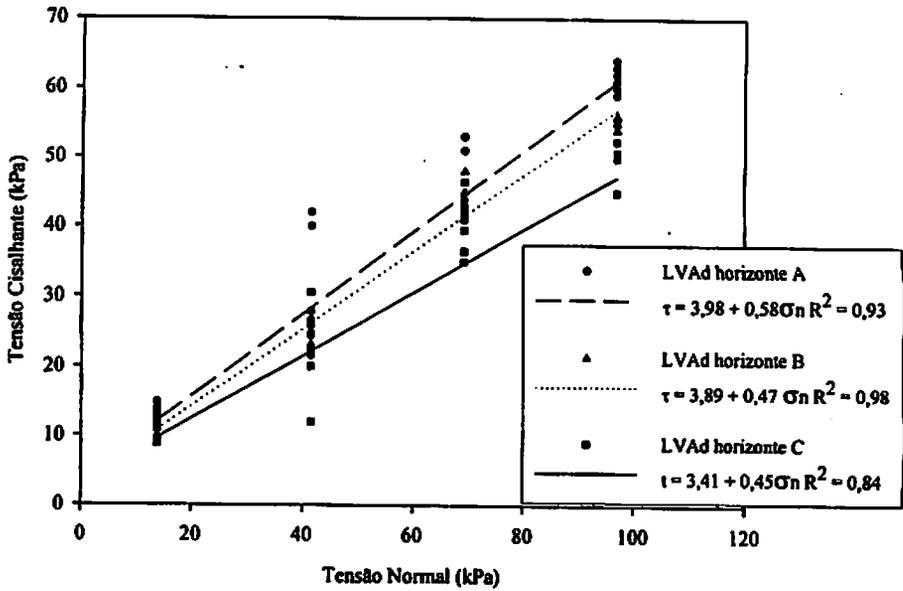


Figura 3.7. Envoltória de resistência dos horizontes A, B e C para o LVAd.

TABELA 3.6. Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes A, B e C para o LVAd, utilizando o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Horizontes	Parâmetros do modelo		
	F	Coefficiente angular	Intercepto de coesão
A x B	ns	*	Ns
A x C	ns	*	*
B x C	ns	ns	*

3.1.4 CXBd2

Para o cambissolo amostrado no sentido transversal à xistosidade (Tabela 3.7), verifica-se que os parâmetros das envoltórias foram diferentes estatisticamente para os três horizontes. Também, neste solo, foi verificada uma maior resistência ao cisalhamento para o horizonte A, para tensões normais acima de 50 kPa (Figura 3.8). Este horizonte apresenta maior conteúdo de matéria orgânica e também um bom desenvolvimento do sistema radicular de gramíneas verificado no campo, proporcionando maiores resistências do que as apresentadas pelo horizonte B, quando submetidas a tensões normais acima de 50 kPa. O horizonte B, para tensões normais abaixo de 50kPa, apresentou maiores valores de resistência ao cisalhamento (Figura 3.8), fato esse que se explica pela presença da xistosidade da rocha de origem, pois como observado em condições de campo, esta xistosidade se manifestava de forma bem evidente neste solo, embora com menos intensidade no horizonte B. Este reflexo da xistosidade no horizonte B pode estar influenciando na resistência ao cisalhamento para tensões normais abaixo de 50kPa. Para tensões normais acima deste valor, essa xistosidade deixa de ter o efeito, mas a resistência ao cisalhamento fica mais relacionada com a estrutura do solo. O horizonte C apresentou, também, nesta classe de solo, uma menor resistência ao cisalhamento. Embora no horizonte C desse solo a xistosidade fosse mais pronunciada, seu efeito em conferir maior resistência ao cisalhamento pode estar sendo suprimido pela quantidade de silte nesse horizonte, que é superior aos demais (Tabela 3.1). Concordando novamente com Scholten (1999), o silte, por apresentar pouca ou nenhuma carga em relação à argila, impede a boa estruturação desse horizonte, minimizando o atrito entre as partículas e conseqüentemente sua resistência ao cisalhamento. No entanto fica evidenciado

*

que para a mesma classe de solo, a estrutura pode tomar maior importância em estudos de resistência ao cisalhamento do que a xistosidade.

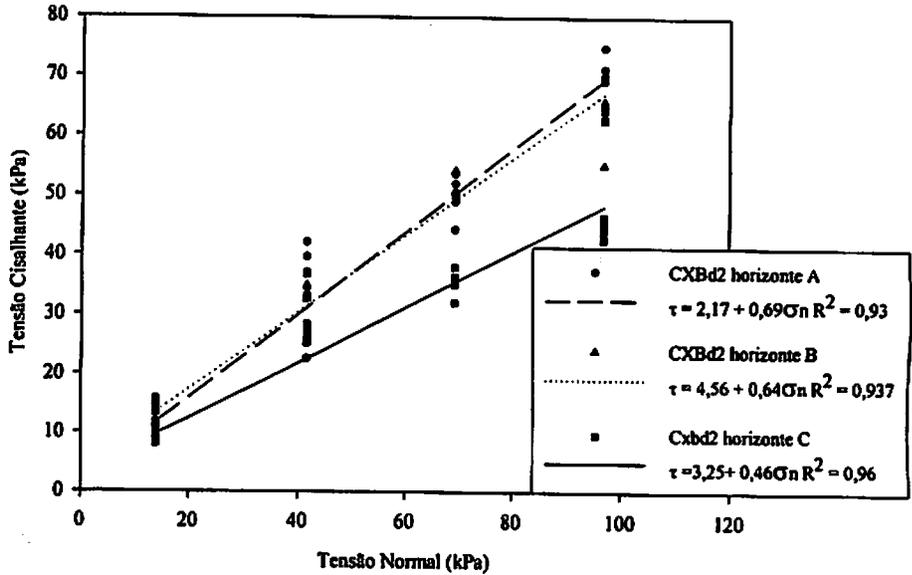


Figura 3.8. Envoltória de resistência dos horizontes A, B e C para o CXBd2

TABELA 3.7. Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes A, B e C para o CXBd2, utilizando o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Horizontes	Parâmetros do modelo		
	F	Coeficiente angular	Intercepto de coesão
A x B	*	*	*
A x C	*	*	*
B x C	*	*	*

A profundidade do solum foi também analisada com relação à resistência ao cisalhamento, ou seja, os horizontes A + B (Figura 3.9 e Tabela 3.8). Conforme observado na Tabela 3.8, todas as classes de solo apresentaram resistência ao cisalhamento estatisticamente diferentes. Analisar a resistência ao cisalhamento do solum representa uma informação importante da susceptibilidade dos solos à erosão por sulcos que podem evoluir para voçorocas. Na figura 3.9, em geral, observa-se que a ordem crescente de resistência ao cisalhamento foi a seguinte: LVd < CXBd1 < LVAd < CXBd2. O CXBd2 apresenta maior resistência ao cisalhamento nos horizontes A + B, fato que o torna menos susceptível à erosão em sulcos, ao maior conteúdo de matéria orgânica e ao reflexo da xistosidade os quais somados, possivelmente conferem a este solo maiores valores de resistência ao cisalhamento.

O menor conteúdo de matéria orgânica (Tabela 3.2) e a estrutura granular tornam o LVd mais susceptível à formação de erosão em sulcos, pois, conforme mostrado na figura 9 essa classe de solo apresenta a menor resistência ao cisalhamento para os horizontes A + B.

A orientação do reflexo da xistosidade no sentido das forças cisalhantes presentes no horizonte B e a maior quantidade de silte tornam o CXBd1 um dos solos de menor resistência ao cisalhamento e mais susceptível à erosão em sulcos quando comparado com o CXBd2 e o LVAd. Esses solos, associados a latossolos, são os de maior incidência de voçorocas na região de Lavras, MG (Silva et al., 1993).

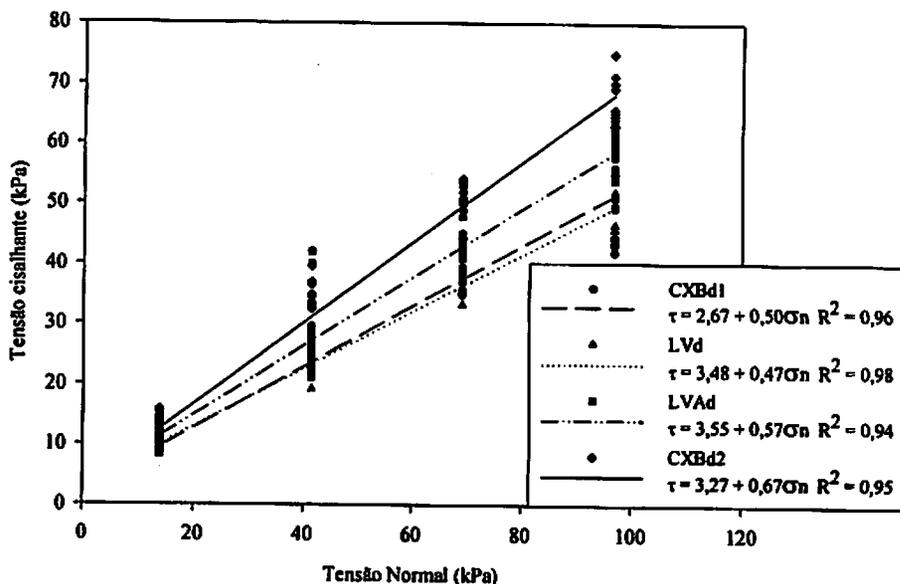


Figura 3.9. Envoltória de resistência dos horizontes A + B dos solos estudados.

TABELA 3.8. Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes A+ B de todos os solos estudados, utilizando o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Classes de Solo	Parâmetros do modelo		
	F	Coefficiente angular	Intercepto de coesão
CXBd1 x LVd	ns	ns	**
CXBd1 x LVAd	*	*	*
CXBd1 x CXBd2	*	*	*
LVd x LVAd	**	**	Ns
LVd x CXBd2	*	*	**
LVAd x CXBd2	*	*	**

3.2 Envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes

3.2.1 horizonte A

As envoltórias de resistência ao cisalhamento foram estatisticamente diferentes pelo teste descrito em Snedecor & Cochran (1989) (Tabela 3.9). A ordem crescente de resistências ao cisalhamento dos horizontes A foi a seguinte: LVd < CXBd1 < LVAd < CXBd2 (Figura 10). A maior resistência ao cisalhamento foi observada no CXBd2 para tensões normais acima de 20 kPa (Figura 3.9), podendo estar associada ao maior conteúdo de matéria orgânica (Tabela 3.2) que, de certa forma, confere maior estruturação a este horizonte. O CXBd1 apresentou maior resistência ao cisalhamento que o LVd para tensões normais acima de 40 kPa, isto também pode ser devido ao maior conteúdo de matéria orgânica apresentado pelo CXBd1 em relação ao LVd (Tabela 3.2). A matéria orgânica age como agente agregador do solo e pode ter aumentado a área de contato das partículas do CXBd1 quando sujeito a pressões maiores que 40 kPa, resultados esses em acordo com as observações de Ekwue & Stone (1995).

O horizonte A do LVAd também está entre os horizontes de maior resistência ao cisalhamento, e qual apresentou um dos maiores conteúdos de matéria orgânica com estrutura em blocos e um emaranhado de raízes de gramíneas cujas, características possivelmente lhe conferiram uma das maiores resistências ao cisalhamento, fato que de acordo com Silva (2002).

Em resumo o horizonte A do CXBd2 apresentou a maior resistência ao cisalhamento, observado principalmente nas maiores tensões normais e evidenciado pelo deslocamento de sua envoltória para cima (Figura 10). Estes resultados sugerem que no CXBd1 é o mais suscetível ao desenvolvimento de erosão em sulcos os quais podem com o decorrer do tempo evoluírem para voçorocas.

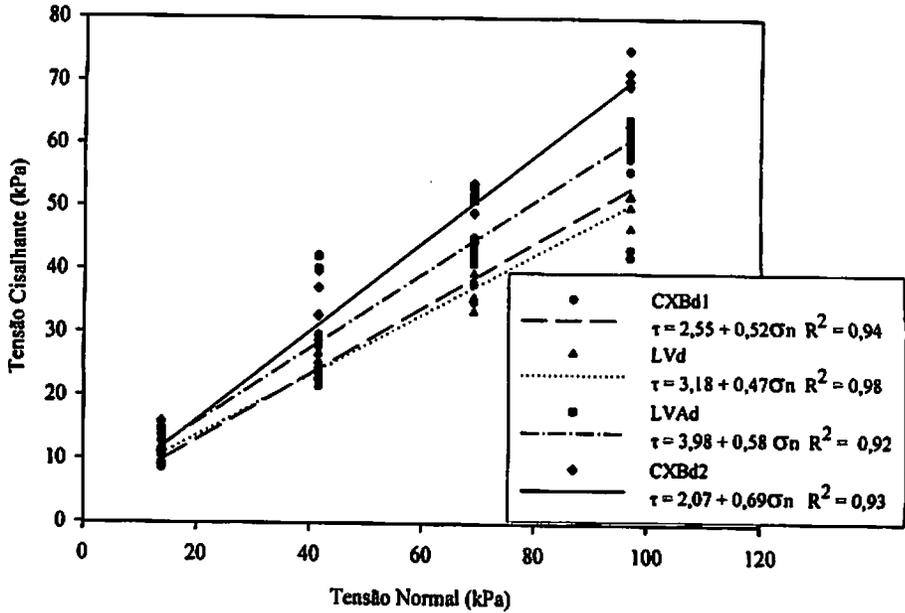


Figura 3.10. Envoltória de resistência ao cisalhamento dos horizontes A dos solos estudados.

TABELA 3.9. Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes A das classes de solo estudadas, utilizando o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Classes de Solo	Parâmetros do modelo		
	F	Coefficiente angular	Intercepto de coesão
CXBd1 x LVd	*	**	**
CXBd1 x LVAd	ns	ns	**
CXBd1 x CXBd2	ns	ns	*
LVd x LVAd	ns	*	*
LVd x CXBd2	ns	*	*
LVAd x CXBd2	ns	*	*

3.2.2 horizonte B

Os parâmetros das envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes B das classes de solo estudadas foram estatisticamente diferentes pelo teste descrito em Snedecor & Cochran (1989) (Tabela 3.10). A maior resistência ao cisalhamento apresentada pelo horizonte B do CXBd2 está relacionada, principalmente, ao reflexo da xistosidade conferida pela rocha de origem. A maior quantidade de silte confere ao CXBd1 uma das menores resistências ao cisalhamento. Com um maior conteúdo de matéria orgânica que o LVd, o CXBd1 apresentou, para tensões normais superiores a 20 kPa, resistências ao cisalhamento maiores que as do LVd (Figura 11). De acordo com Silva et al. (1994), a estrutura tendendo para blocos, caracterizada pela relação $Ct/(Ct + Gb)$ (Tabela 3.2), maior valor da densidade do solo (Tabela 3.4), colocam o horizonte B do LVAd entre os solos de maior resistência. Em contra partida, associado ao menor conteúdo de matéria orgânica e maior quantidade de Fe_2O_3 , a menor relação $Ct/(Ct + Gb)$ (Tabela 3.2), observada para o LVd, fazem com que o horizonte B desse solo seja o menos resistente quanto ao cisalhamento (Figura 3.11), basicamente em função de sua estrutura granular com reduzida área de contato (Silva, 1990).

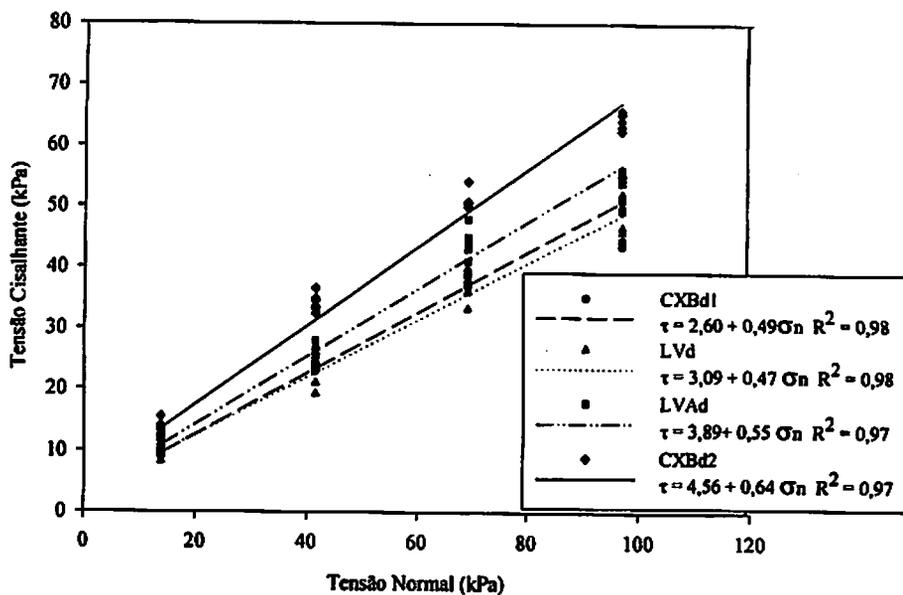


Figura 3.11. Envoltória de resistência ao cisalhamento dos horizontes B dos solos estudados

TABELA 3.10. Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes B das classes de solo estudadas, utilizando o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Classes de Solo	Parâmetros do modelo		
	F	Coefficiente angular	Intercepto de coesão
CXBd1 x LVd	ns	ns	*
CXBd1 x LVAd	ns	**	*
CXBd1 x CXBd2	ns	*	*
LVd x LVAd	ns	*	*
LVd x CXBd2	**	*	*
LVAd x CXBd2	**	ns	*

3.2.3 Horizonte C

As envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes C das classes de solo estudadas foram estatisticamente diferentes exceto para o LVAd e CXBd2 (Tabela 3.10). Na figura 3.12, observa-se que a ordem crescente de resistências ao cisalhamento para os horizontes C das classes de solos estudadas foi a seguinte: $CXBd1 < LVd < LVAd < CXBd2$. A não diferença estatística entre o CXBd2 e o LVAd (Tabela 3.11) pode ser justificado, pela igualdade estatística da densidade do solo (Tabela 3.3) e quantidade de areia para o horizonte C dessas duas classes de solo (Tabela 3.1) que, por serem maiores, condicionaram também maiores resistências ao cisalhamento. Para o CXBd2 a xistosidade da rocha de origem contribuiu para colocá-lo entre as classes de solo de maior resistência, devido ao fato de que a aplicação de uma força cisalhante no sentido perpendicular à xistosidade do solo promoverá uma reação que conferirá ao solo uma maior resistência ao cisalhamento devido ao aumento do atrito interno (Ortigão, 1995). O CXBd1 foi o solo que apresentou o horizonte C com a menor resistência ao cisalhamento, devido à maior quantidade de silte apresentada nesse horizonte (Tabela 3.1). Aliado à maior quantidade de silte, outro aspecto importante a essa menor resistência ao cisalhamento, observada no CXBd1, deve-se ao fato de que a força cisalhante foi aplicada no sentido do reflexo da xistosidade a qual passa então atuar como linhas de fraqueza e, por conseguinte, reduzindo a resistência ao cisalhamento do solo (Ortigão, 1995).

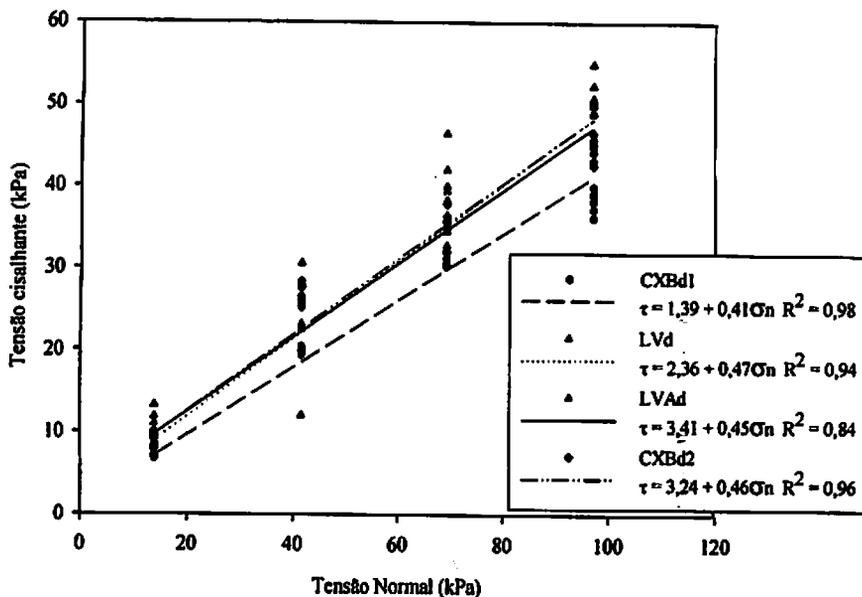


Figura 3.12. Envoltória de resistência ao cisalhamento dos horizontes C dos solos estudados.

TABELA 3.11. Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento dos horizontes C das classes de solo estudadas, utilizando o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Classes de Solo	Parâmetros do modelo		
	F	Coefficiente angular	Intercepto de coesão
CXBd1 x LVd	ns	*	*
CXBd1 x LVA	ns	*	*
CXBd1 x CXBd2	ns	*	*
LVd x LVAd	**	ns	**
LVd x CXBd2	ns	ns	**
LVAd x CXBd2	ns	ns	ns
LVAd + CXBd2 x CXBd1	*	*	*
LVAd + CXBd2 x LVd	*	*	*

Uma vez não encontradas diferenças significativas entre as resistências ao cisalhamento dos horizontes C dos solos LVAd e CXBd2, os valores de tensões normais e resistências ao cisalhamento foram juntadas e uma nova envoltória de resistência foi ajustada (Figura 3.13). Esta nova envoltória foi então comparadas, com as demais envoltórias dos horizontes C dos solos e ficou comprovado estatisticamente pelo teste de Snedecor & Cochran (1989) serem diferentes (Tabela 3.11).

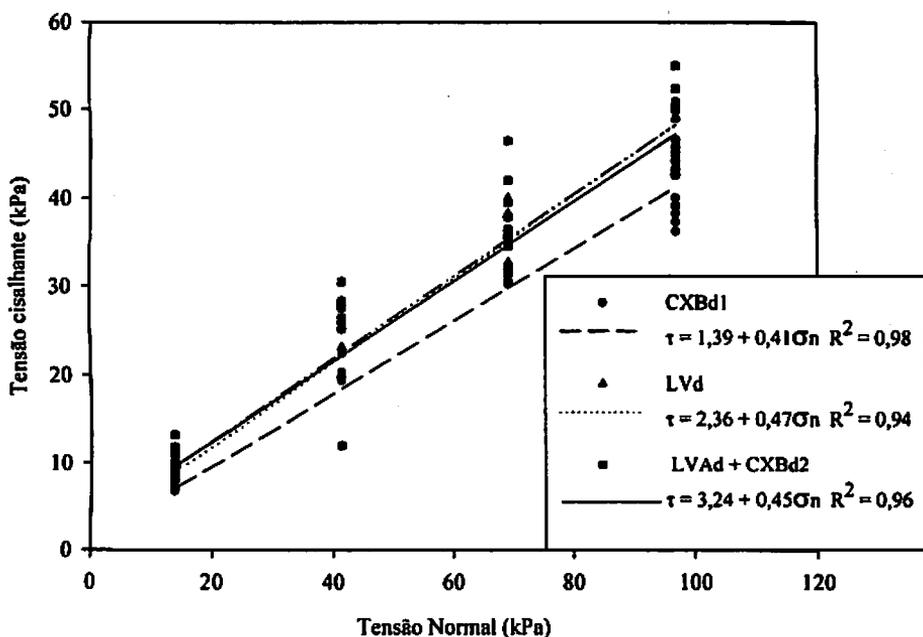


Figura 3.13. Envoltória de resistência ao cisalhamento dos horizontes C dos solos CXBd1, LVd e LVAd + CXBd2.



3.3 Envoltórias de resistência ao cisalhamento dos taludes totais

Neste estudo, para construção das envoltórias de resistência ao cisalhamento, foram considerados todos os pares de valores de resistência ao cisalhamento e tensão normal de cada classe de solo, o que de certa forma caracteriza as voçorocas como um todo. As envoltórias de resistência ao cisalhamento (Figura 3.14) foram estatisticamente diferentes entre si pelo teste descrito em Snedecor & Cochran (1989) (Tabela 3.12). O CXBd2 foi a classe de solo que apresentou a maior resistência ao cisalhamento, fato este observado principalmente nas maiores tensões normais e evidenciado pelo deslocamento de sua envoltória para cima. A ordem crescente da resistência ao cisalhamento foi a seguinte: CXBd1 < LVd < LVAd < CXBd2. Estes resultados sugerem que, no CXBd1, em condições naturais, possa ser desenvolvido uma maior quantidade de voçorocas do que nas outras classes de solo.

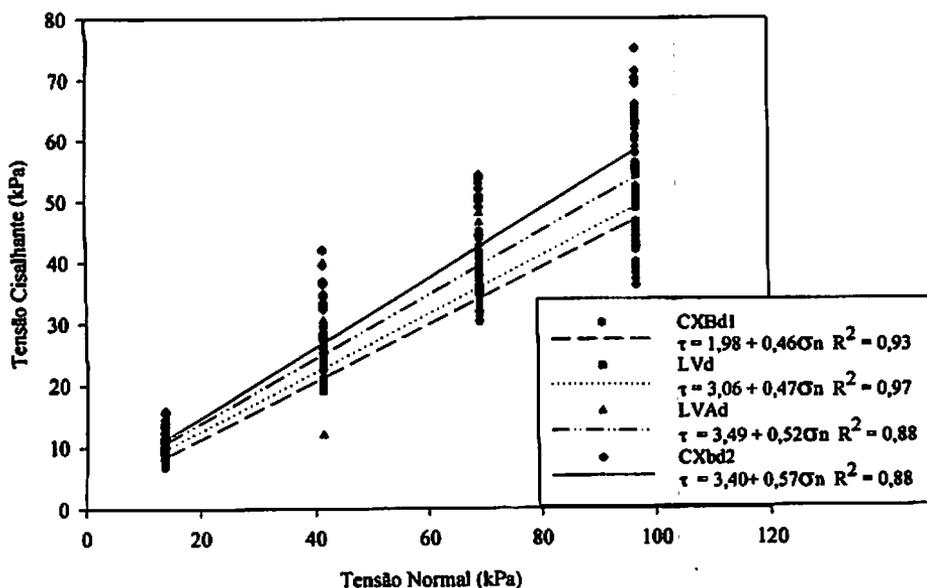


Figura 3.14. Envoltória de resistência ao cisalhamento dos quatro solos estudados.

TABELA 3.12. Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento das três classes de solo da região de Lavras, MG utilizando o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989).

Classes de Solo	Parâmetros do modelo		
	F	Coefficiente angular	Intercepto de coesão
CXBd1 x LVd	ns	ns	**
CXBd1 x LVA	ns	*	*
CXBd1 x CXBd2	*	*	*
LVd x LVAd	ns	*	*
LVd x CXBd2	*	*	*
LVAd x CXBd2	*	ns	*

ns = não significativo; * = significativo a 1% e ** significativo a 5%

De uma forma geral, solos com maiores quantidades de areia (Tabela 3.1), apresentaram as maiores resistências ao cisalhamento (Rocha et al., 2002)

como é o caso aqui do CXBd2 e LVAd, devido à capacidade da areia se arranjar de forma mais acirrada quando submetida a esforços externos, conferindo em consequência maior resistência aos solos (Dias Junior & Miranda (1999). A menor resistência ao cisalhamento, apresentada pelo CXBd1, pode estar associada às maiores quantidades de silte (Tabela 3.1), agindo como fator desagregador da estrutura desse solo. Aliado aos fatores já mencionados, a menor resistência ao cisalhamento do CXBd1 pode estar também associada ao sentido da aplicação da força cisalhante que, neste caso, foi o mesmo da xistosidade. Já a aplicação da força cisalhante perpendicular à xistosidade, pode ter contribuído para que o CXBd2 apresentasse a maior resistência ao cisalhamento. Estas observações evidenciam a importância do estudo do sentido da xistosidade em estudos de erosão do solo.

Um outro fato a ser levado em consideração no estudo da resistência ao cisalhamento é a mineralogia dos solos. A menor resistência ao cisalhamento do LVd, em relação ao LVAd, pode ser justificado pelo motivo de que esse solo apresenta maiores quantidades de argila e a menor relação $Ct/(Ct + Gb)$ (Tabelas 3.1 e 3.2). A maior quantidade de gibbista em sua fração argila, somada ao seu maior conteúdo de Fe_2O_3 , conferem a este solo uma estrutura granular com reduzida área de contato entre as partículas e, por conseguinte, baixa resistência ao cisalhamento (Rocha et al., 2001).

No LVAd, o valor de 0,44 da relação $Ct/(Ct + Gb)$ (Tabela 3.2) indica uma maior quantidade de caulinita em relação ao LVd com uma relação $Ct/(Ct + Gb)$ de 0,27, o que para o LVAd, pode estar condicionando uma estrutura tendendo para blocos que se desfazem em grânulos, fato esse também observado na análise de campo. Esta estrutura proporciona uma maior área de contato entre as partículas do solo acarretando em maiores resistências ao cisalhamento (Rocha et al., 2002).

De uma maneira geral, para a classe dos Latossolos, o solo que apresentou maior valor de densidade do solo (Tabela 3.3), apresentou também maior resistência ao cisalhamento, como no caso específico, o LVAd (Figura 3.14). Associado a esses maiores valores de densidade do solo, o menor teor de ferro e maiores quantidades de caulinita, presentes na estrutura do LVAd (Tabela 3.2), conferem a este solo uma maior área de contato entre as partículas e por conseqüência maiores valores de resistência ao cisalhamento.

A influência da densidade do solo na resistência ao cisalhamento também se verifica no horizonte C da classe dos Cambissolos (Tabela 3.3), onde o CXBd2 apresentou uma maior densidade do solo, o que possivelmente também contribuiu para sua maior resistência ao cisalhamento conforme demonstrado na figura 3.14. Uma maior densidade do solo indica uma maior proximidade das partículas (Mesri, 1997), promovendo uma maior área de contato e conseqüentemente maior resistência ao cisalhamento.

4 CONCLUSÕES

1. O CXBd2, solo cujo ensaio de cisalhamento foi realizado com reflexo da xistosidade no sentido transversal à força cisalhamento apresentou maior resistência.
2. O CXBd1, solo com maiores quantidades de silte e reflexo da xistosidade no sentido longitudinal à força cisalhante apresentou menor resistência ao cisalhamento.
3. Dentre os horizontes, o horizonte A de todos os solos foi o de maior resistência ao cisalhamento.
4. Para a classe dos Latossolos, o LVAd foi o que apresentou maior resistência.

5. Espera-se que solos, com estrutura em blocos, sejam em igualdade de condições de umidade do solo mais resistentes ao voçorocamento do que aqueles com estrutura granular.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa – MG.** 1999. 169 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics.** 4. ed. New York: John Wiley, 1960. 229 p.

BENJAMIN, J. G.; CRUSE, R. M. Measurement of shear strength and bulk density of soil aggregates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1248-1251, Sept./Oct. 1985.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulky density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis.** 2. ed. Madison: American Society of Agronomy. 1986a. v. 1, p. 363-375. (Agronomy, 9).

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulky density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis.** 2. ed. Madison: American Society of Agronomy. 1986b, v. 1, p. 377-382. (Agronomy, 9).

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed). **Methods of soil analysis.** Madison: American Society of Agronomy, 1965. v. 1, p. 544-566.

DELFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo.** Viçosa-MG: UFV, 1981. 17 p (Boletim de Extensão, 29).

CRUSE, R. M.; LARSON, W. E. Effects of soil shear strength on soil detachment due to rain drop impact. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 4, p. 777-781, July/Aug. 1977.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic.** 1994. 114 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Michigan state University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M. S.; MIRANDA, E. E. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras - MG. **Ciencia Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 2, p. 337-346, abr./jun. 2000.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago. 1996.

DAVIES, P. Influence of organic matter, moisture status and time after reworking on soil shear strength. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 36, n. 2, p. 299-306, Mar./Apr. 1985.

TORRI, D.; BORSELLI, L. Equation for high-rate gully erosion. **Catena**, Amsterdam, v. 50, n. 2/4, p. 449-467, Jan. 2003.

EKWUE, E. J.; STONE, R. J. Organic matter effects on the strength properties of impacted agricultural soils. **Transactions of the American Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 38, n. 2, p. 357-365, Mar./Apr. 1995.

GANTZER, C. J.; BUYANOVSKY, G. A.; ALBERTS, E.; REMLEY, P. A. Effects of soybean and crop residue deposition on soil strength and splash detachment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 202-206, Jan./Feb. 1987.

JASTROW, J. D.; MILLER, R. M.; LUSSENHOP, J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 30, n. 7, p. 905-916, July 1998.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 497-506, jul./set. 1999.

MEHRA, O. P.; JACKSON, N. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clays Minerals**, Clarkson, v.7, p. 317-327, 1960.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995. v. 1, 374 p.

PINTO, C. S. **Resistência ao cisalhamento dos solos.** São Carlos: Grêmio Politécnico, 1989.

RAMAMURTHY, T. Shear strength response of some geological materials in triaxial compression. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, Oxford, v. 38, n. 5, p. 683-697, 2001.

ROCHA, W. W.; DIAS JUNIOR, M. S.; LIMA, J. M. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos da região de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 297-303, abr./jun. 2002.

ROCHA, W. W.; DIAS JÚNIOR, M. S.; LIMA, J. M. Shear strength as affected by soil mineralogy. In: ANNUAL MEETING OF SOCIETY OF AGRONOMY IN UNIVERSITY, 2001, North Caroline.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; PAGLIAI, M.; PELLEGRINI, N.; VIGNOZZI, N. Effects on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3/4, p. 143-155, Sept. 2001.

SHOLTEN, T. Hydrology and erodibility of the soils and saprolite cover of the Swaziland Middleveld. **Soil Tecnology**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 247-262, Sept. 1997.

SIDORCHUK, A. Gully erosion modeling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland. **Catena**, Amsterdam, v. 49, n. 3/4, p. 312-328, Nov. 2003.

SILVA, A. C. **Relação entre voçorocas e solos na região de Lavras-MG**. 1990. 124 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

SILVA, A. C.; LIMA, J. M.; CURI, N. Relações entre voçorocas, uso da terra, solo e materiais de origem da região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 459-464, 1993.

SILVA, R. B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. 2002. 142 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Cimes: Iowa State University, 1989. 161 p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil mechanics in engineering practice. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1997. 499 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science, Oxford*, v. 33, n. 1, p. 141-163, Mar. 1982.

VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo: McGraw-Hill, 1989. 509 p.

ZANG, B.; ZHAO, Q. G. ; HORN, R.; BAUMGARTL, T. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil Tillage Research, Amsterdam*, v. 59, n. 1/2, p. 97-106, Apr. 2001.

CAPÍTULO 4

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E ESTABILIDADE DE TALUDES DE VOÇOROCAS DA REGIÃO DE LAVRAS, MG

RESUMO

Vários autores relatam a importância do conhecimento da resistência ao cisalhamento dos solos para estudos de estabilidade de taludes, porém existe ainda uma carência no conhecimento dos parâmetros da resistência ao cisalhamento que caracterizam os solos tropicais. O objetivo desse estudo foi o de propor o ângulo estável de retaludamento de quatro voçorocas desenvolvidas em três solos da região de Lavras, MG, utilizando os parâmetros da resistência ao cisalhamento. Estimou-se através de um modelo matemático para as classes de solo: Latossolo Vermelho Amarelo (LVAd), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Cambissolo distrófico (CXBd1 e CXBd2), o ângulo máximo que daria estabilidade aos taludes das voçorocas desenvolvidas nesses solos. O Cambissolo, por apresentar expressiva xistosidade, os ensaios foram realizados em dois sentidos, sendo o CXBd1 caracterizado pelo ensaio no sentido da xistosidade e CXBd2 caracterizado pelo ensaio no sentido transversal à xistosidade. O ensaio de cisalhamento foi conduzido com os solos na umidade de saturação. A análise dinâmica de estabilidade mostra no geral que o CXBd2 é o solo que requer um maior ângulo de estabilização, seguido pelo LVAd, LVd e CXBd1. A forte xistosidade no CXBd2, seu maior teor de matéria orgânica, coloca este solo como o mais resistente e com maiores ângulos de estabilização. O LVAd, com estrutura tendendo para blocos e com teores de matéria orgânica também mais elevados, apresenta alta resistência e também permite um maior ângulo de estabilização. O LVd e CXBd1 foram os solos que apresentaram menores resistências e conseqüentemente menores ângulos de estabilização, muito disso em função da maior quantidade de silte, xistosidade no sentido longitudinal, menor teor de matéria orgânica para o CXBd1. Para o LVd, a estrutura granular e baixo teor de matéria orgânica contribuíram para que este solo tivesse um dos menores ângulos de estabilização. O horizonte A tendeu ser o mais resistente ao cisalhamento (Capítulo 3). Os ângulos de estabilidade calculados para os Horizontes A + B foram superiores aos ângulos do horizonte C. Em função da reduzida altura e maior quantidade de matéria orgânica, os solos CXBd2 e CXBd1 apresentaram os maiores ângulos de estabilidade para os

horizontes A + B, seguidos pelo LVAd e por último pelo LVd. Além desse aspecto, a influência da altura foi mais significativa quando se analisaram os taludes divididos em alturas menores (bermas de 6m), onde se constatou que menores alturas do talude implica em maiores ângulos de estabilização e possivelmente menores custos da obra.

ABSTRACT

SHEAR STRENGTH AND SLOPE STABILITY OF GULLIES FROM LAVRAS, MG, REGION

Several authors recognized the importance of the knowledge of the soil shear strength slope stability for studies, however still exists a lack of knowledge of the shear strength parameters that characterize the tropical soils. The objective of this study was to propose the slope stable angle for four gullies erosion developed in three soils of the Lavras, MG, region, using the shear strength parameters. It was estimated through a mathematical model for the soil classes Red-Yellow Latosol (LVAd), distroferric Red Latosol (LVd), and Inceptsoil (CXBd1 and CXBd2), the maximum angle that would give stability to the gullies slopes developed in those soils. Due to the expressive xistosity present in the Inceptsoil, the tests were accomplished in two directions, being CXBd1 characterized by the test done in the longitudinal xistosity direction and CXBd2 characterized by the test done in the traverse direction of the xistosity. The shear strength tests were done with the soils samples at the saturation moisture content. The dynamic analysis of stability shows in general that the CXBd2 is the soil that requests a larger stabilization angle, followed by LVAd, LVd and CXBd1. The strong xistosity of the CXBd2 and the largest organic matter content, places this soil as the most resistant and with larger stabilization angles. The LVAd, with structure tending to blocks and with organic matter content also higher, presents high resistance and also allows a larger stabilization angle. The LVd and CXBd1 were the soils that presented smaller resistances and consequently smaller stabilization angles, in a function of the largest amount of silt, xistosity in the longitudinal direction, smaller organic matter content. For the LVd, the granular structure and low organic matter content contributed for the smallest stabilization angle of this soil. The A horizon tended to be the most resistant to the shear (Chapter 3). The stability angles calculated for the A + B horizons were superior to the angles of the C horizon. In a function of the reduced height and larger amount of organic matter, the soils CXBd2 and CXBd1 presented the largest stability angles for the A + B horizons, followed by LVAd and LVd. Beyond of that aspect, the influence of the height was more significant when the slopes were analyzed divided in smaller heights (berm of 6m), where it was verified that smaller heights of the slope implicate in larger stabilization angles and possibly smaller costs of the work.

1 INTRODUÇÃO

A expressão mais flagrante da erosão é a voçoroca, a qual constitui uma forma de erosão acelerada que põe em risco a saúde de homens e animais que circulam pela área, promovendo também uma significativa redução da área de plantio (SABESP, 1989). A voçoroca pode ser formada através de uma passagem gradual da erosão laminar para erosão em sulcos e ravinas cada vez mais profundas (Parzanese, 1991) ou então, diretamente, a partir de um ponto de elevada concentração de águas sem a devida dissipação de energia. Esta forma de erosão merece um destaque especial, por apresentar um poder destrutivo local superior ao das outras formas de erosão.

O processo de voçorocamento engloba diversos fenômenos: a erosão subsuperficial, a erosão interna, solapamentos e descalçamentos, desabamentos e escorregamentos, que conjugam no sentido de dotar esta forma de erosão de elevado poder destrutivo (Sidorchuk, 1999). Isto se manifesta de maneira flagrante nas grandes dimensões desta forma de erosão até dezenas de metros de largura e com várias centenas de metros de comprimento e, nas grandes velocidades de avanço, através da rápida evolução de seus ramos ativos que atingem edificações, estradas, obras públicas e redução de áreas de plantio (DAEE, 1989).

Apesar do reconhecimento da importância da determinação da resistência ao cisalhamento em estudos de erosão (Zang et al., 2001; Misra & Teixeira, 2001), a carência de informações sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos agrícolas e suas relações com as demais propriedades dos solos, tem limitado o desenvolvimento de técnicas que visem à estabilidade de taludes de terra, principalmente no caso de voçorocas. Durante o processo de evolução das voçorocas seus taludes podem sofrer ruptura mecânica segundo

uma superfície de falhamento que apresenta em todos os seus pontos tensão de cisalhamento no limite da resistência ao cisalhamento.

No caso de estudos de estabilidade de taludes, o correto é promover o ensaio de cisalhamento nas amostras de solo orientadas no sentido do declive, pois, assim, os resultados poderão ser aplicados em concordância com a distribuição de forças presente no solo. Neste ensaio, a imposição do plano de ruptura é uma desvantagem quando se trata de testar solos aparentemente homogêneos (Ortigão, 1995), cujo plano de fraqueza não foi detectado a priori. Pode-se, por exemplo, incorrer em erro de moldar o corpo-de-prova, segundo a direção de maior resistência, obtendo-se resultados contra a segurança. Já nos materiais que exibem planos preferenciais de menor resistência, como os solos com xistosidade bem definida, há interesse em se avaliar sua resistência ao cisalhamento em função da direção, conforme figura 4.1. Um exemplo concreto desta situação é o Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, região de mineração de ferro próxima às cidades de Ouro Preto e Itabira, em que as rochas da Série Minas são compostas de filitos, itabiritos e quartzitos cujos regolitos apresentam fortes xistosidades em horizontes mais profundos e reflexos da xistosidade da rocha de origem em horizontes mais superficiais e mais intemperizados. Quando se analisa a estabilidade de taludes em situações como a dessa região, é necessário considerar a variação da resistência ao cisalhamento com a direção, caso em que o ensaio de cisalhamento direto é uma ferramenta útil, devido à possibilidade de se escolher a direção do plano de ruptura, que nem sempre é feito.

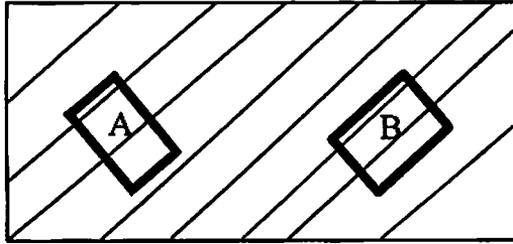


Figura 4.1. Amostra de solo com forte xistosidade de onde foram moldados corpos de prova: Paralelo (A) e transversal (B).

A erosão em voçorocas é um sério problema em diversas partes do mundo, suas causas, processos, predição e controle têm despertado o interesse de vários pesquisadores. Martinez (2002) sugere que pesquisas voltadas para morfologia e estágio de desenvolvimento das voçorocas sejam o primeiro passo para se determinar sua suscetibilidade à erosão. Segundo esse mesmo autor, a modelagem da erosão em voçorocas tem focado mais a parte qualitativa baseada em modelos estatísticos empíricos, que de certa forma pode vir, em muitos casos, a sub ou superestimar os parâmetros físicos envolvidos nesse processo. Porém, com o advento da tecnologia digital, estudos como o de área de contribuição, influência da topografia, têm contribuído na melhor elaboração de modelos de predição, controle e a influência de diferentes condições do solo e climáticas na formação de voçorocas (Desmet et al., 1999).

Para estudar a tipologia das voçorocas e os efeitos dessa forma de erosão, como produção e deposição de sedimentos e predizer os riscos das voçorocas no âmbito social e os possíveis impactos econômicos, diferentes táticas tem sido usadas:

a) Uma modelagem hidráulica proposta por Sidorchuck (1999), por ser este um modelo hidráulico, pode ocorrer também uma sub estimativa de alguns parâmetros físicos. Rocha et al. (2001) propôs um modelo dinâmico baseado no

equilíbrio das forças atuantes no talude, sendo os parâmetros da resistência ao cisalhamento dos solos de fundamental importância.

b) O mapeamento das voçorocas trata-se de uma forma precisa de quantificação e devido a isso, diferentes métodos vêm sendo desenvolvidos para este fim com a grande vantagem do uso de imagens de satélite.

Imagens de satélites em escala temporal larga e média, fotografias aéreas e pinos ou estacas, vêm sendo utilizados no monitoramento de voçorocas (Oostwoud Wijdenes et al., 2000), auxiliando principalmente no que diz respeito à produção de sedimentos. Técnicas que utilizavam fotografias aéreas em escalas multitemporais, para mapear e quantificar as mudanças volumétricas de voçorocas no Mediterrâneo foram utilizadas por Poesen (1996) que, segundo Martinez-Casasnovas et al. (2002) foi um precursor de estudos dessa natureza.

Já Martinez-Casasnovas et al. (2002) utilizaram um modelo digital que considera a variação das elevações medidas na superfície quantificaram, com certa precisão, os processos de produção, transporte e deposição de sedimentos. Para o monitoramento de voçorocas, Ries & Marsof (2002) usaram um balão inflável no qual foi acoplado um jogo de câmeras programadas para realizarem fotos em tempos pré-determinados. Como este balão trabalha próximo ao solo, a resolução das fotografias é maior e confere uma boa precisão do material fotográfico, facilitando a interpretação das variações volumétricas, que possibilita uma melhor interpretação da dinâmica de formação e transporte dos sedimentos. Um fator importante neste método é o custo bem mais reduzido comparado aos serviços realizados por aviões e helicópteros.

A textura do solo também afeta a estabilidade dos taludes de voçorocas, (Lopes, 1996) que conclui ser impossível existir, em areia pura e seca, um talude com inclinação maior que seu ângulo de atrito interno. Upadhyaya (1994) demonstrou que não há limitação de altura do talude, quando o ângulo do talude é inferior ao de atrito interno. Os solos argilosos, entretanto, têm constituintes e

comportamento completamente diversos dos da areia. As argilas possuem características de capacidade de adsorção de água e ânions, plasticidade e coesão. A coesão por exemplo tem importância fundamental na resistência ao cisalhamento, pois permite que as partículas se comportem como soldadas, razão pela qual existem taludes com inclinações maiores que seus ângulos de atrito interno.

Uma técnica de retaludamento foi proposta por Rocha et al. (2001) visando à redução do ângulo da encosta com o intuito de estabilizar a voçoroca de uma maneira mais econômica. Estes autores sugerem que somente o retaludamento não é suficiente para estabilizar e controlar a voçoroca. Associada ao retaludamento, outras práticas tais como: drenagem superficial e subterrânea, estruturas de ancoramento devem ser usadas associadas a práticas vegetativas. Sidorchuck (1999) sugeriu um modelo de estabilidade de taludes de voçorocas na Austrália em função do transporte e o volume de sedimentos produzidos por uma encosta e da estabilidade do talude das voçorocas. Sidorchuck et al. (2003) basearam nos parâmetros da resistência ao cisalhamento do solo para descrição da estabilidade dos taludes das voçorocas, sugerindo a inclusão da variação da umidade do solo na determinação da estabilidade dos taludes, fato esse que não se justifica, uma vez que os parâmetros da resistência ao cisalhamento do solo estão diretamente associados à umidade do solo (Rocha et al., 2002). A redução da resistência ao cisalhamento do solo com o aumento da umidade também foi verificada por Silva (2002) e segue o modelo exponencial $\tau = 10^{(a+bU)}$.

Estudos (Rocha, et al., 2002; Silva, 2002) têm mostrado que a umidade do solo afeta a resistência ao cisalhamento, devido a sua influência na coesão do solo. Por ser a resistência ao cisalhamento dos solos essencialmente um fenômeno de atrito, a coesão determinada, nesse estudo, é a coesão aparente ou intercepto de coesão (c). Este parâmetro representa uma parcela da resistência ao cisalhamento dos solos, presente apenas em solos parcialmente saturados (Pinto,

1989; Vargas, 1989 e Azevedo, 1999). Saturando-se ou secando-se o solo totalmente, a coesão desaparece, justificando assim o nome de aparente.

Para estudos da estabilidade de taludes em terra (Williams & Shayewich, 1970) verificaram que, após a infiltração de água no perfil do solo, ocorre uma redução da resistência ao cisalhamento do solo na zona localizada acima da frente de umedecimento, provocada pela redução total ou parcial da sucção, que pode provocar o deslizamento da massa de solo acima desta.

Um outro fator que também contribui para reduzir a resistência ao cisalhamento do solo está relacionado ao aumento da força peso no sentido do declive do talude ou do terreno que favorece o desabamento da lateral da voçoroca, responsável pelo aumento da erosão, e é causado principalmente pela redução da coesão aparente e do ângulo de atrito interno (Sidorchuck et al., 2002 e Silva, 2002).

Nos cálculos de taludes é aconselhável se usar um fator de segurança (FS) (Maquaire et al., 2003) para aumentar a segurança dos taludes. Um valor de FS de 1,5 ou 2,5 pode ser visto como aceitável, pois representa uma situação familiar que a experiência sugere ser segura, apresentando uma probabilidade de ruptura de 1: 10.000 (Guidicini & Nieble, 1993). Para não haver ruptura, a atuação das forças resistivas deve ser FS vezes a atuação das forças ativas em um talude. Maquaire et al. (2003), entretanto, chegam a propor um fator de segurança variando entre 1 e 1,5.

Os objetivos desse estudo foram: a) testar um modelo matemático na determinação de ângulos estáveis de barrancos de voçorocas b) determinar o ângulo máximo estável para retaludamento de voçorocas, c) verificar a estabilidade dos diferentes horizontes dos solos estudados onde se desenvolveram as voçorocas, d) verificar o efeito da xistosidade e o reflexo dessa xistosidade em horizontes mais superficiais dos solos quanto à resistência

ao cisalhamento e retaludamento de taludes de voçorocas e d) propor um índice de atividade das voçorocas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado na região de Lavras, MG, com latitude média de 45° e longitude de 21°, em voçorocas desenvolvidas nas seguintes classes de solos: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) A moderado, textura argilosa; Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) A moderado, textura argilosa; Cambissolo Háplico Tb distrófico típico (CXBd) A moderado, textura média. Os números 1 e 2, utilizadas para o Cambissolo (Tabela 1), são para diferenciar o sentido do reflexo da xistosidade no perfil do solo com relação ao sentido de evolução da voçoroca, onde: O Cambissolo foi ensaiado em função da xistosidade: CXBd1 sentido longitudinal da xistosidade, CXBd2 sentido transversal da xistosidade

2.1 Caracterização das voçorocas

A declividade média (média de 10 determinações) e o comprimento das voçorocas, foram determinados com o auxílio de um nível ótico e os dados são apresentados na tabela 4.1.

TABELA 4.1. Características das voçorocas localizadas em diferentes classes de solos na região de Lavras, MG.

Solo	Profundidade média (m)	Espessura dos horizontes A + B	Comprimento médio (m)	Inclinação média do talude (graus)
Latossolo Vermelho Amarelo	16	2,2	108	80
Latossolo Vermelho Distrófico	25	2,5	215	76
Cambissolo Distrófico1	30	0,70	260	70
Cambissolo Distrófico2	20	0,65	63	85

2.2 Amostragem dos solos

Foram amostrados 120 locais, com amostras indeformadas em cada voçoroca, perfazendo um total de 480 amostras, as quais foram coletadas em amostradores especialmente desenvolvidos para ensaios de cisalhamento (Rocha et al., 2001). A coleta se deu em esquema de malhas, com distâncias variando de 0,5m a 16m entre conjuntos de quatro amostras na direção horizontal (Figura 4.2) e variando de 0,3 a 3,5m em profundidade nos solos. Para cada sentido amostral, foi respeitada uma distância mínima de 0,1m; as distâncias entre os conjuntos de amostras foram estabelecidas para que os horizontes A, B e C pudessem ser incluídos nas análises.

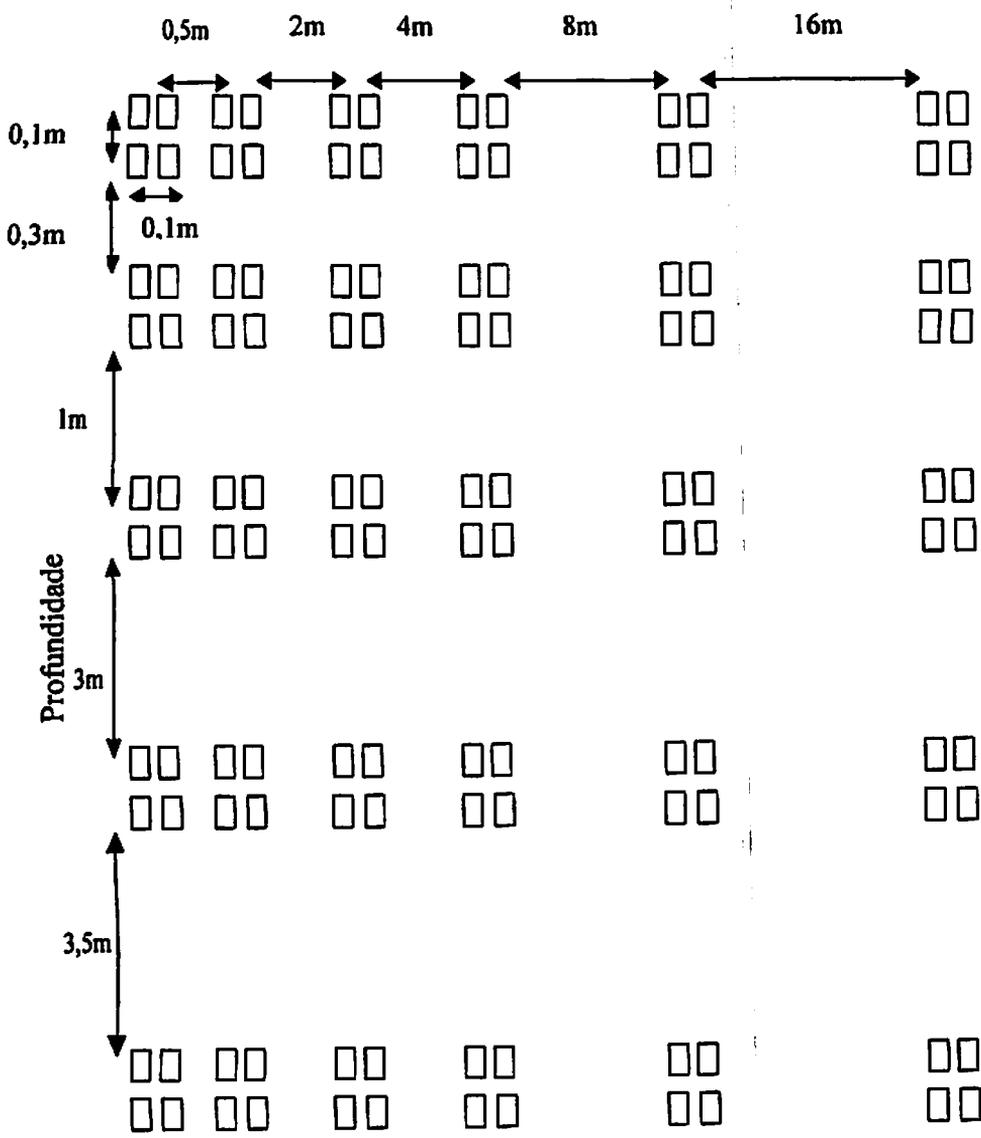


Figura 4.2. Esquema de coleta das amostras para o ensaio de cisalhamento.

2.2.1 Preparo das amostras

As amostras de solo, antes de serem submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, foram saturadas e colocadas em papel filtro por alguns segundos para retirar o excesso de água. Este estudo foi realizado com as amostras saturadas devido ao fato de que, na saturação, as tensões capilares dos solos são reduzidas e, conseqüentemente, sua resistência ao cisalhamento também é reduzida (Terzaghi, 1997), tornando essa condição de umidade do solo a mais crítica no dimensionamento de taludes de terra.

2.2.2 Ensaio de cisalhamento direto

Utilizou-se, no ensaio de cisalhamento direto, uma prensa de cisalhamento fabricada pela ELE International (Digital Shear Machine, 26-112 - 9901X0089) (Figura 1.2). O equipamento operou com velocidade de deslocamento horizontal de $3,33 \times 10^{-5}$ m/s e tensões normais de 14, 42, 70 e 97 kPa. A calibração da prensa de cisalhamento foi realizada conforme descrito no capítulo 1.

2.3 Estabilidade dos taludes

Com o objetivo de demonstrar a importância do conhecimento dos parâmetros da resistência ao cisalhamento do solo na estabilização de taludes em terra, principalmente no caso de voçorocas, levou-se em consideração neste estudo apenas a ruptura em cunha, por ser este o tipo de falhamento mais freqüente (Holtz & Kovacs, 1981), ressaltando que outros tipos de rupturas podem ocorrer no maciço terroso (figura 4.3).

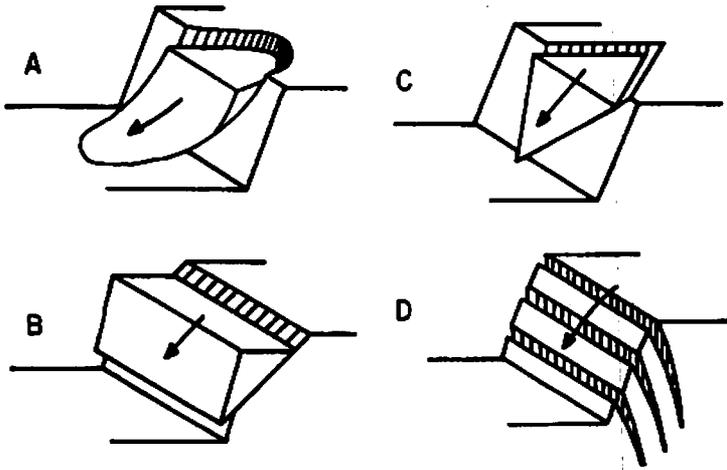


Figura 4.3. Principais tipos de ruptura em taludes. Ruptura circular (A), ruptura plana (B), ruptura em cunha (C) e ruptura em blocos (D).

2.3.1 Avaliação dos Taludes

No caso de taludes, em uma condição limite de equilíbrio, com um ângulo β com a horizontal, uma altura h da superfície de falhamento que faz um ângulo α com a horizontal (Figura 4.4), o módulo da força resistiva, aqui chamado de T , no desmoronamento, será:

$$T = N \tan\phi + cL \quad (1)$$

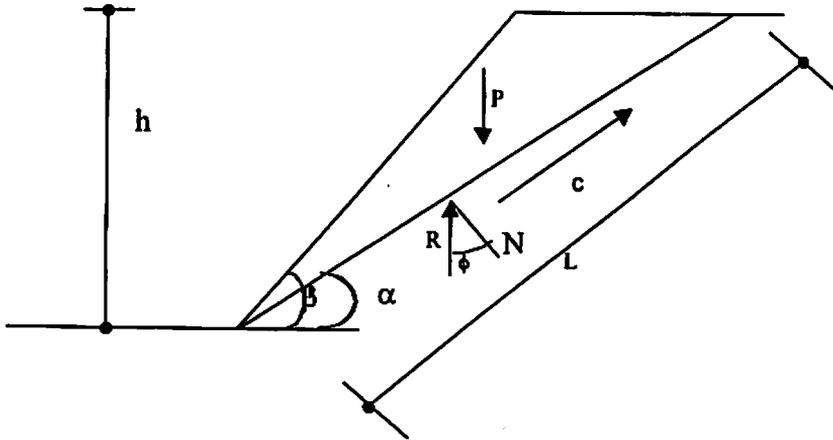


Figura 4.4. Diagrama de forças ativas e resistivas em um talude em terra instável.

Em que: N é o componente normal do peso da cunha instável ($N = P \cos \alpha$), ϕ é o ângulo de atrito interno do solo e c o intercepto de coesão deste solo (kPa), sendo estes dois últimos parâmetros, obtidos através de um ensaio de resistência ao cisalhamento do solo em laboratório.

Em uma análise dinâmica do processo de ruptura, qualquer talude está submetido à ação de forças ativas, responsáveis pelo desmoronamento e forças resistivas que tendem a manter esse talude estável. No caso das forças ativas, a principal é apenas a componente tangencial do peso P da cunha instável, ou seja:

$$P \sin \alpha = P \cos \alpha \tan \phi + cL \quad (2)$$

O peso da cunha instável pode ser descrito também como (Harr, 1977):

$$P = [d_s g h^2 \sin(\beta - \alpha)] / [2 \sin \beta \sin \alpha] \quad (3)$$

Em que d_s é a densidade do solo (kgm^{-3}) e g a aceleração local da gravidade (ms^{-2}).

Baseado nas equações 2 e 3, Harr (1977) propõe um Número de estabilidade (Ne) que relaciona o equilíbrio entre as forças ativas e passivas atuante no talude e este numero é dado por:

$$Ne = d_s g h / c = 2 \operatorname{sen}\beta / \operatorname{sen}(\beta - \alpha) (\operatorname{sen}\alpha - \operatorname{cos}\alpha \tan\phi) \quad (4)$$

Para se encontrar o ponto de mínima resistência, faz-se a derivada de Ne em função de α , encontrando:

$$\alpha_c = (\beta + \phi) / 2 \quad (5)$$

Em que: α_c é o ângulo crítico da superfície de falhamento, ou seja, o ângulo acima do qual haverá escorregamento da massa de solo.

Substituindo α_c em (4), obtém-se a altura crítica do talude, que é dada por:

$$h_c = 2 c \operatorname{sen}\beta \operatorname{cos}\phi / d_s g \operatorname{sen}^2[(\beta - \phi)/2]$$

A estabilidade de um talude de terra, incluindo o FS, pode ser calculada pela seguinte equação:

$$(d_s g h / c.FS) = 2 \operatorname{sen}\beta / \operatorname{sen}(\beta - \alpha) (\operatorname{sen}\alpha - \operatorname{cos}\alpha \tan\phi) \quad (6)$$

Substituindo α por α_c , tem-se então:

$$(d_s g h_c / c.FS) = 2 \operatorname{sen}\beta \operatorname{cos}\phi / \operatorname{sen}^2[(\beta - \phi)/2] \quad (7)$$

Fixando os parâmetros d_s , c e ϕ , na equação 7, as variáveis são h_c e β , na qual se pode estudar a inclinação da encosta (β), variando a altura (h) da mesma.

2.3.1 Fator de segurança e índice relativo de atividade

Neste estudo o fator de segurança teórico adotado foi de 1,5.

Para caracterizar a atividade das voçorocas, calculou-se também o índice de atividade que é a razão entre o ângulo do talude original medido no campo e o ângulo estável do talude calculado.

2.4 Bermas

Para um melhor entendimento da relação da altura do talude com sua estabilidade, foi feita uma simulação da construção de bermas de 6m (Figura 4.5) e, por se considerar o horizonte C como o mais crítico para estabilização, suas características foram utilizadas no modelo matemático proposto para o cálculo do ângulo estável das bermas.

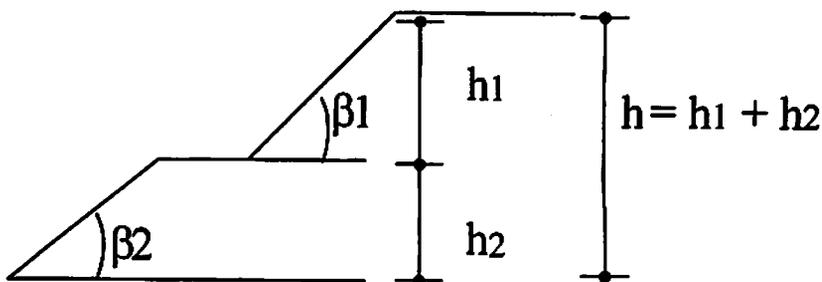


Figura 4.5 Construção de taludes em bermas.

2.5 Determinação do ângulo estável de inclinação do talude

Para a determinação do ângulo estável de inclinação do talude (β), utilizou-se o software matemático Maple 5 for Windows e análise estatística dos dados foi realizada considerando os experimentos montados em faixas e a comparação dos resultados foi feita pelo teste de Skott knot com 5% de significância.

Os parâmetros c e ϕ foram obtidos das envoltórias de resistência conforme especificado no capítulo 1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na discussão dos resultados, consideram-se todos os horizontes A, B e C como um todo e horizontes A+B e C, pois, assim podem-se analisar os ângulos necessários para o retaludamento das camadas de solos.

Para o cálculo do ângulo estável da voçoroca como um todo, considerou-se a profundidade total da voçoroca e os parâmetros: densidade do solo, c , ϕ e fator de segurança se mantiveram constantes para a mesma classe de solo. Por ser o horizonte C o mais crítico em obras de contenção e no desenvolvimento de voçorocas (Poesen et al., 2002), suas características foram utilizadas como referência para o cálculo do ângulo estável de todo o talude das voçorocas.

O CXBd1 apresentou o menor ângulo estável do talude (Tabela 4.2), sugerindo ser essa classe de solo a que requer maiores cuidados com relação ao voçorocamento e por consequência cuidados especiais em obras de contenção. Essa maior susceptibilidade ao voçorocamento se deve ao seu maior teor de silte, concordando com Poesen et al. (2002) e Maquaire et al. (2003), baixa quantidade de matéria orgânica no horizonte C (Terzaghi, 1997) (Tabela 3. 2), sentido do reflexo da xistosidade da rocha de origem (Ortigão, 1995) e maior profundidade da voçoroca (Tabela 4.1).

Os solos mais estáveis, ou seja, com possibilidade de maiores ângulos de retaludamento, são o CXBd2 e o LVA_d seguidos pelo LV_d e por fim pelo CXBd1 (Tabela 2). Da mesma forma como demonstrado no capítulo 2, essa maior estabilidade do CXBd2 é devido principalmente ao sentido da xistosidade. Embora esse solo apresente também uma maior quantidade de silte, que teoricamente o tornaria menos estável, o cisalhamento quando ocorre no sentido contrario a xistosidade, encontra uma resistência, que confere a esse solo essa maior estabilidade (Ortigão, 1995). Essa maior resistência apresentada pelo

CXBd2, pode ser melhor visualizada nos parâmetros da resistência ao cisalhamento c e ϕ apresentados e discutidos no capítulo 2, onde os maiores de c estão associados a maiores valores de densidade do solo, conferindo maior resistência ao cisalhamento aos solos e, conseqüentemente, maior estabilidade estrutural a esses (Rocha et al., 2001).

Observa-se, também, pela tabela 4.2 que o LVAd apresentou um dos maiores ângulos de estabilidade, fato esse explicado pela maior relação $Ct/(Ct + Gb)$, as conferir a este solo uma estrutura tendendo para blocos (Silva, 1995), que associado a um maior teor de matéria orgânica e maior densidade do solo (Tabelas 3.2 e 3.3), fazem com que o LVAd na umidade de saturação apresente uma das maiores estabilidades de talude.

TABELA 4.2. Ângulos estáveis dos taludes para os solos estudados na umidade de saturação.

Solo	Altura total (m)	Ângulo estável na umidade de saturação (graus)
LVAd	16	42,08a
LVd	25	35,84b
CXBd1	30	31,80c
CXBd2	20	44,33a

O LVd é um dos solos com baixa resistência ao cisalhamento e com o segundo menor ângulo de estabilidade dentre os solos estudados (Tabela 4.2), devido principalmente à sua estrutura granular, a qual segundo Silva (1993) e Rocha et al. (2001), conferem a este solo uma menor área de contato entre os agregados e, conseqüentemente, baixa resistência ao cisalhamento.

3.1 Horizontes A+B e Horizontes C

Ao se analisar os horizontes A+B e C (Tabela 4.3), observa-se que o solum é mais estável para todas as classes de solos, devido a esses horizontes apresentarem um maior teor de matéria orgânica que, conforme já discutido no capítulo 2, confere uma melhor agregação ao solo, propiciando maior resistência ao cisalhamento e à possibilidade de maiores ângulos de estabilidade a taludes (Tabela 4.3).

TABELA 4.3. Ângulos estáveis dos taludes para os solos estudados para os horizontes A + B e C na umidade de saturação.

Solo	Profundidade	Profundidade	Ângulo estável na umidade de	
	dos	do horizonte	saturação (graus)	
	horizontes	C	Horizontes	Horizonte
	A+ B	(m)	A +B	C
	(m)			
LVAd	2,2	13,80	80,21bA	39,85aB
LVd	2,5	22,50	73,33cA	34,93bB
CXBd1	0,70	29,30	90,74aA	28,05cB
CXBd2	0,65	19,35	100,26aA	39,10aB

Letras Maiúsculas testam a diferença estatística na horizontal. (Skott knot 5%)

Letras Minúsculas testam a diferença estatística na vertical (Skott knot 5%)

Os elevados ângulos de estabilidade, 100,26° e 90,74°, obtidos nos horizontes A + B para os solos CXBd2 e CXBd1, respectivamente, são devidas à reduzida profundidade desses horizontes e maiores conteúdos de matéria orgânica (Tabela 3.2). Os horizontes C de todas as classes de solos estudadas apresentam menores ângulos estáveis comparados com os dos horizontes A + B, significando menor estabilidade do horizonte C frente ao voçorocamento. Os horizontes C desses solos, além da maior profundidade, fator que limita sua estabilização, apresenta teores elevados de silte (Tabela 3.1), fator que dificulta a

organização de partículas em unidades estruturais mais estáveis o que concorda com Scholten (1999).

Entre as classes de solo, os ângulos de estabilidade dos horizontes C são diferentes estatisticamente (Tabela 4.3). Ao analisar os ângulos calculados para as profundidades A+B e C, observa-se que, para a mesma classe de solo, esses ângulos foram estatisticamente diferentes entre si, o que vem mais uma vez comprovar que, além de fatores como a estrutura do solo, a altura do talude assume um papel fundamental na estabilização de voçorocas.

A altura do talude a ser estabilizado é um fator importante nos cálculos do ângulo estável. Considerando as grandes alturas dos taludes, o retaludamento em bermas (Figura 4.5) é uma prática viável, pois aumenta o valor do ângulo de estabilização e torna a estrutura mais estável e econômica (Morgan et al., 2003). A construção de bermas reduz a altura do talude e, conseqüentemente, promove um aumento do ângulo estável do talude. A maior vantagem na mudança da geometria do talude de terra é que seus efeitos são permanentes, pois melhora a estabilidade do maciço por promover mudanças permanentes no sistema de forças atuantes no talude (Guidicini & Nieble, 1993).

Associada a fatores como densidade do solo, textura, estrutura e teor de matéria orgânica, a profundidade do horizonte exposto ou altura do talude assume papel de extrema importância, visto que, ao se comparar os resultados mostrados nas tabelas 4.2 e 4.3, verifica-se a influência da profundidade ou altura dos horizontes dentro da voçoroca. Analisando-se essas tabelas, fica evidente que maiores profundidades dos horizontes expostos ou alturas de taludes requerem menores ângulos para estabilização. Para Lopes (1996), no entanto, é possível mesmo existirem taludes verticais estáveis, ocorrendo, porém a limitação da altura. Isto é, quanto mais íngreme um talude, menor a altura estável possível de existir. No caso das areias entretanto, quando, a inclinação do talude se igualar ao ângulo de atrito interno, a altura se torna infinita.

Tabela 4.4. Ângulos estáveis dos taludes para construção de bermas.

Solo	Altura da berma (m)	Ângulo estável na umidade de saturação (graus)	Profundidade total (m)	Ângulo estável na umidade de saturação (graus)	Espessura do horizonte C (m)	Ângulo estável na umidade de saturação (graus) para os horizontes C
LVAd	6,00	49,49aA	16,00	42,08aB	13,80	39,85aC
LVd	6,00	46,56bA	25,00	35,84bB	22,50	34,93bB
CXBd1	6,00	36,59cA	30,00	31,80cB	29,00	28,05cC
CXBd2	6,00	48,86aA	20,00	44,33aB	29,00	39,10aC

Letras Maiúsculas testam a diferença estatística na horizontal. (Skott knot 5%)

Letras Minúsculas testam a diferença estatística na vertical (Skott knot 5%)

Na tabela 4.4 observa-se que todas as classes de solos apresentaram diferenças estatísticas para os ângulos estáveis das bermas de 6m, dos taludes totais (horizontes A+B+C) e dos ângulos dos taludes correspondentes aos horizontes C, exceto para o LVAd e CXBd2 que foram iguais. Em geral, os ângulos se apresentaram na seguinte ordem decrescente: bermas > talude total > horizonte C, exceção apenas observada para o LVd, que apresentou igualdade estatística para os ângulos correspondentes ao talude total (horizontes A+B+C) e ao horizonte C, embora se observe também, uma superioridade da berma seguida pelo talude total e pelo horizonte C. A não diferença estatística observada no LVd se deve, possivelmente, ao fato desta classe de solo se encontrar em uma condição mais estável de desenvolvimento com uma estrutura granular principalmente em função dos óxidos de ferro e alumínio.

Menor ângulo de retaludamento para uma mesma classe de solo implica em um maior número de horas de máquinas para a execução da obra e, conseqüentemente, mais onerosa ela se torna. Os resultados obtidos nesse estudo indicam que a voçoroca desenvolvida no CXBd1 é a que requer maiores cuidados no retaludamento e com menores ângulos de corte na reconstrução do talude. O retaludamento do CXBd1 pode, a princípio, parecer uma obra mais

onerosa, porém o LVAd, com estrutura tendendo para blocos e maior resistência ao cisalhamento, pode requerer um maior número de horas/máquinas e com um maior consumo de combustível, mesmo sendo o ângulo de retaludamento do LVAd maior, o que também é válido para o CXBd2.

3.2 Índice Físico Relativo de Atividade

Para se caracterizar a atividade de uma voçoroca, considerando a declividade média das voçorocas observadas no campo (Tabela 4.1) e nos ângulos de segurança calculados pela equação 7 (Tabela 4.2), foi proposto um índice relativo que mede a atividade de evolução das voçorocas. Este índice é definido como sendo a relação entre os ângulos de segurança propostos e a declividade média observada no campo em graus. Assim, têm-se (Tabela 4.5) os índices calculados para as diferentes classes de solos estudadas.

Tabela 4.5. Inclinação média do talude, Ângulo estável na umidade de saturação, índice de estabilidade relativo (IRA) 1/IRA.

Solo	Inclinação média do talude (graus)	Ângulo estável na umidade de saturação (graus)	IRA	1/IRA
LVAd	80	42,08a	0,52	1,92
LVd	76	35,84b	0,47	2,1
CXBd1	70	31,80c	0,44	2,2
CXBd2	85	44,33a	0,51	1,96

Observa-se que, quanto menor o valor desse índice, maior a atividade dessa voçoroca, fato esse também que caracteriza o CXBd1 como a classe de solo que requer maiores cuidados com relação a obras de recuperação e conservação.

O fator $1/IRA$ é um teste do fator de segurança real dos ângulos estáveis. Os valores de $1/IRA$, maiores que o valor do FS teórico pré-estabelecido antes do cálculo, reafirma a segurança da obra a ser construída. Conforme mostrado pela tabela 4.5, todos os valores do fator $1/IRA$ foram maiores que 1,5, que é o FS utilizado nos cálculos dos ângulos estáveis dos taludes das voçorocas. Isso implica que os ângulos calculados conferiram estabilidade aos taludes das voçorocas.

4 CONCLUSÕES

1. O modelo matemático é eficiente na determinação de ângulos estáveis de taludes em terra.
2. O Cambissolo, cujo cisalhamento ocorreu no sentido longitudinal ao reflexo da xistosidade, foi o solo que apresentou o menor ângulo de estabilização.
3. O solum A+B dos solos estudados foi o mais resistente ao cisalhamento que os demais horizontes e, conseqüentemente, com maiores ângulos de estabilização.
4. O horizonte C foi o menos resistente ao cisalhamento e com menores ângulos de estabilidade.
5. O Cambissolo cujo cisalhamento ocorreu no sentido transversal ao reflexo da xistosidade da rocha de origem apresenta maiores resistências ao cisalhamento e, conseqüentemente, maiores ângulos de estabilização para voçorocas.
6. Com base no índice de estabilidade calculado, o fator de segurança estabelecido para início dos cálculos está coerente e confere a segurança desejada para o talude.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa – MG.** 1999. 169 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Controle de erosão:** bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional; orientações para o controle de voçorocas urbanas. São Paulo: DAEE/IPT, 1989. 92 p.

DESMET, P. J. J.; POESEN, J.; GOVERS, G.; VANDAELE, K. Importance of slope gradient and contributing area for optimal of initiation and trajectory of ephemeral gullies. *Catena*, Amsterdam, v. 37, n. 3/4, p. 377-392, Nov. 1999.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Edgar Blucher, 1993. v. 1.

HARR, M. E. **Mechanics of particulate media:** a probabilistic approach. New York: McGraw-Hill, 1977. 543 p.

LOPES, J. A. U. Estimativa de estabilidade de encostas naturais e procedimentos preventivos/ corretivos da engenharia civil. In: **III curso de atualização:** recuperação de áreas degradadas. Curitiba, Pr, 1996. p. 59-81.

MAQUAIRE, O.; MALET, J. P.; REMAITRE, A.; LOCAT, J.; KLOTZ, S.; GUILLON, J. Instability conditions of marly hillslopes: towards landsliding or gullyng? The case of the Barcelonnette Basin, South East France. *Engineering Geology*, London, v. 70, p. 109-130, 2003.

MARTINEZ-CASANOVAS, J. A. Spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, Amsterdam, v. 48, n. 1/2, p. 2-16, June 2002.

MARTINEZ-CASANOVAS, J. A.; RAMOS, M. C.; RIBES-DASI, M. Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. *Geoderma*, Amsterdam, v. 102, n. 1/2, p. 125-140, June 2002.

MISRA, R. K.; TEIXEIRA, P. C. The sensitivity of erosion and erodibility of forest soils to structure and strength. *Soil Tillage Research*, Amsterdam, v. 59, n. 1/2, p. 81-93, Apr. 2001.



MORGAN, R. P. C.; MIRTSKHOULAVA, T. S. E.; NADIRASHVILI, V.; HANN, M. J.; GASCA, A. H. Spacing of Berms for Erosion Control along Pipeline Rights-of-way. **Biosystems Engineering**, London, v. 2, n. 2, p. 249-259, June 2003.

OHU, O. J.; RAGHAVAN, G. S. V.; McKYES, E.; MEHUY, G. Shear strength prediction of soils with varying added organic matter contents. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Paul, v. 29, n. 2, p. 351-355, Mar./Apr. 1986.

OOSTWOUD WIJDENES, D. J.; POESEN, J.; VANDEKERCKHOVE, L.; GHESQUIERE, M. Spatial distribution of gully head active and sediment supply along in ephemeral channel in a Mediterranean environment. **Catena**, Amsterdam, v. 39, n. 3, p. 147-167, Apr. 2000.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995. v. 1, 374 p.

PARZANEZE, G. A. C. **Gênese e desenvolvimento de voçorocas em solos originados de rochas granitoides na região de Cachoeira do Campo, Minas Gerais**. 1991. 117 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PINTO, C. S. **Resistência ao cisalhamento dos solos**. São Carlos: Grêmio Politécnico, 1989.

POESEN, J. W. Erosion, flooding and channel management in the Mediterranean environments of southern Europe. **Catena**, Amsterdam, v. 21, n. 1/2, p. 157-199, Jan. 1996.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, Amsterdam, v. 46, n. 2/3, p. 243-252, Jan. 2002.

RAMAMURTHY, T. Shear strength response of some geological materials in triaxial compression. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, Oxford, v. 38, n. 5, p. 683-697, 2001.

RIES, J. B.; MARZOLFF, I. Monitoring of gully erosion in the Central Ebro Basin by large-scale aerial photography taken from a remotely controlled blimp. **Catena**, Amsterdam, v. 50, n. 2/4, p. 2-20, Jan. 2002.

ROCHA, W. W.; DIAS JUNIOR, M. S.; LIMA, J. M. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos da região de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 297-303, abr./jun. 2002.

ROCHA, W. W.; DIAS JÚNIOR, M. S.; LIMA, J. M. Shear strength as affected by soil mineralogy. In: ANNUAL MEETING OF SOCIETY OF AGRONOMY IN UNIVERSITY, North Caroline.

SIDORCHUK, A. Dynamic and static models of gully erosion. **Catena**, Amsterdam, v. 37, n. 3/4, p. 401-414, Nov. 1999.

SIDORCHUK, A. Gully erosion modeling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland. **Catena**, Amsterdam, v. 49, n. 3/4, p. 312-328, Nov. 2002.

SILVA, A. C. **Relação entre voçorocas e solos na região de Lavras-MG**. 1990. 124 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

SILVA, A. C.; LIMA, J. M.; CURTI, N. Relações entre voçorocas, uso da terra, solo e materiais de origem da região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 2, p. 459-464, maio/ago. 1993.

SILVA, R. B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. 2002. 142 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1997. 499 p.

UPADHYAYA, S. K.; CHANCELLOR, W.; PERUMPRAL, J. V.; SCHAFER, R.; GILL, W. R.; VANDENBERG, G. E. **Advances in soil dynamics**. St. Joseph: ASAE, 1994. v. 1, 304 p.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1989. 509 p.

WILLIAMS, J. R.; SHAYKEWICH, C. F. The influence of soil water matric potencial on the strength properties of unsaturated soil. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 34, n. 6, p. 835-840, Dec. 1970.

ZANG, B.; ZHAO, Q. G .; HORN, R.; BAUMGARTL, T. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 59, n. 1/2, p. 97-106, Apr. 2001.