

EDUARDO ENEAS DE FIGUEIREDO

EROSÃO EM RAVINAS E O MECANISMO DE ALARGAMENTO LATERAL

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Ciências

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

VAJAPEYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN

Orientador

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

- 1987 -

88-F-12 05.11



F475e Figueiredo, Eduardo Eneas de
Erosao em ravinas e o mecanismo de alargamento lateral /
Eduardo Eneas de Figueiredo. - Campina Grande, 1987.
149 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

1. Erosao em Ravinas 2. Recursos Hidricos 3. Solo - 4.
Lencol Freatico 5. Bacias Hidrograficas 6. Dissertacao I.
Srinivasan, Vajapeyam Srirangachar. Dr. II. Universidade
Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) III. Titulo

CDU 551.435.162(043)

EROSÃO EM RAVINAS E O MECANISMO DE ALARGAMENTO LATERAL


Eduardo Eneas de Figueiredo

Autor

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21 / 12 / 1987



VAJAPEYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN
Orientador



MASAYOSHI SHIMIZU
Membro da Banca



MANOEL GILBERTO DE BARROS
Membro da Banca

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

DEZEMBRO, 1987

AGRADECIMENTOS

O autor agradece sinceramente ao Prof. Dr. Vajapeyam S. Srinivasan pela orientação e ensinamentos indispensáveis à realização deste trabalho; aos professores da Área de Recursos Hídricos do CCT/UFPb pela orientação acadêmica; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - pelo incentivo através de bolsa de estudo; à Universidade Federal da Paraíba pela oportunidade concedida; ao Prof. Ubald Koch por facilitar a aquisição de parte do material bibliográfico; ao Prof. Manoel Gilberto de Barros pelo incentivo dado para a realização do curso; enfim, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização da tese.

EM ESPECIAL:

Agradeço em especial a minha Esposa "Eveline" e aos meus filhos "Eduardo Henrique", "Fabrício Eneas" e "Flávio Vinicius", submetidos ao sacrifício durante todo o curso. Agradeço também aos meus pais "Antonio Eneas" e "Raimunda Ribeiro" pelo amor, compreensão e orientação dedicados ao longo dos anos.

SUMÁRIO

	Página
1 - INTRODUÇÃO	01
2 - EROÇÃO SUPERFICIAL E A EROÇÃO EM RAVINAS	04
2.1 - Aspectos Gerais da Erosão Superficial	04
2.2 - Causas e Mecanismos da Erosão em Ravinas	07
2.3 - Estudos sobre os Fatores de Influência	11
2.4 - Produção de Sedimentos nas Ravinas	18
2.5 - Equações de Previsão de Erosão em Ravinas	23
2.6 - Estudos sobre as Medidas de Conservação e Controle	25
3 - TRATAMENTO ANALÍTICO DO ALARGAMENTO LATERAL	27
3.1 - Aspectos Gerais do Problema	27
3.2 - Alargamento Lateral pela Infiltração	30
3.2.1 - O Sistema Considerado	30
3.2.2 - Coesão Mínima para a Estabilidade	32
3.2.3 - O Plano de Ruptura Crítico	34
3.2.4 - Umidade Crítica	35
3.2.5 - Início do Processo de Alargamento	37
3.2.6 - Previsão do Tempo de Ruptura	38
3.3 - Influência da Presença de Fendas de Tração	45
3.4 - Influência do Lençol Freático no Alargamen- to Lateral	50
3.4.1 - Os Limites Físicos da Zona Saturada	54

	Página
3.5 - Influência Conjunta do Lençol e de Fendas de Tração no Alargamento Lateral	56
3.5.1 - Influência do Lençol com a Fenda na Superfície	56
3.5.2 - Influência do Lençol com a Fenda na Parede	59
3.6 - Comentários Sobre o Tratamento Analítico	62
4 - APLICAÇÕES DEMONSTRATIVAS DAS EQUAÇÕES	64
4.1 - Generalidades	64
4.2 - Situações Geométricas	65
4.3 - Condições Físicas do Solo	67
4.4 - Condições Hidrometeorológicas	68
4.4.1 - A Intensidade das Chuvas	68
4.4.2 - A Duração das Chuvas e as Condições Antecedentes	69
4.5 - Outras Considerações	71
4.6 - Procedimento para Aplicação	72
4.7 - Os Resultados Obtidos	75
5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	76
6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXO A : TABELAS	96
ANEXO B : PROGRAMA COMPUTACIONAL	132

RESUMO

A erosão em ravinas e sua influência na produção de sedimentos nas bacias hidrográficas são discutidas nesta dissertação.

O mecanismo de alargamento lateral por ruptura, uma etapa característica do desenvolvimento das ravinas, é estudado analiticamente. O procedimento analítico é fundamentado numa análise de estabilidade de paredes de ravinas, na qual é levada em consideração a variação das condições físicas do solo e sua resistência com a variação do teor de umidade imposta pelas condições hidrometeorológicas. A análise resulta na formulação de equações para as condições críticas do alargamento, para diferentes situações, considerando-se a influência da infiltração, do lençol freático e da presença de fendas de tração.

A condição crítica para o alargamento em cada situação é associada com uma umidade crítica e quando esta é provocada pela infiltração o tempo mínimo necessário para a ruptura ocorrer é estabelecido através da curva de infiltração de Horton. Para fins de simplicidade, a lâmina infiltrada é calculada para um ponto representativo das condições médias.

ABSTRACT

Gully erosion and its influence on the production of sediments within the hydrographic basins of water courses are discussed in the present dissertation.

The mechanism of gully enlargement by the rupture of gully walls - a characteristic step in the development of gullies - is treated analytically. The procedure is based on the analysis of stability of the gully walls by taking into consideration the variation of the physical conditions of the soil and its shear resistance due to the variation in the moisture content. The variation of the soil moisture is essentially attributed to the process of infiltration as determined by the hydrometeorological conditions. The analysis has resulted in the formulation of equations representing the critical conditions for gully enlargement for various situations including the influence of the saturated zone of ground water and the presence of tension cracks.

The critical conditions for gully enlargement for each of the situations is associated with a critical water content of the soil and when this condition is caused by the infiltration process, the minimum time necessary for the side wall rupture is determined by making use of the infiltration curve of Horton. For the sake of simplicity, the equivalent lamina of water that must infiltrate is calculated for a single representative point where average conditions are supposed to prevail.

1 - INTRODUÇÃO

O aproveitamento dos recursos naturais de água e solo tem, reconhecidamente, sido afetado pelo fenômeno da erosão do solo. Não se pode prescindir, dentro do contexto do planejamento, projeto, utilização e/ou conservação dos recursos naturais, dos problemas causados pela erosão.

Nos últimos anos muito se avançou e muito foi escrito sobre os processos de erosão do solo, graças ao grande volume de pesquisas desenvolvidas nesta área. Entretanto, alguns processos continuam ainda relativamente pouco estudados, devido, basicamente, à natureza complexa dos mesmos, como também devido à falta de trabalhos de campo e de registros confiáveis que possibilitem uma melhor compreensão do fenômeno. O processo de erosão em ravinas, embora qualitativamente bem estudado, ainda necessita de estudos que permitam a formulação analítica deste, assim como da quantificação da produção de sedimentos.

Os métodos quantitativos, encontrados na literatura, sobre o processo de erosão em ravinas são de natureza empírica não podendo serem transferidos sem restrições para outros locais. Uma tentativa de se estabelecer uma metodologia que possa ser aplicada de maneira geral, torna-se altamente relevante.

Muitas dificuldades são encontradas numa avaliação

quantitativa dos processos de erosão do solo devido aos muitos fatores que influenciam nos mesmos. Entretanto, o maior obstáculo fica por conta dos próprios mecanismos em si. A erosão em ravinas é um fenômeno natural e como tal só poderia ser quantificada, seguramente, se todos os fatores envolvidos fossem conhecidos e levados em consideração. Em geral, duas causas principais contribuem para o desenvolvimento das ravinas: o escoamento superficial e a gravidade. Entretanto, quando o desenvolvimento das ravinas atinge um certo estágio, a infiltração da água das chuvas e o lençol freático, bem como as fendas de tração tornam-se altamente relevantes. Neste estágio, devido a ação individual ou conjunta destes fatores junto com a gravidade, grandes quantidades de solo são erodidas pela ruptura das paredes dos canais de drenagem, caracterizando o mecanismo de alargamento lateral das ravinas.

Numa tentativa de somar subsídios aos estudos da erosão do solo, este trabalho tem por objetivos:

- Avaliar a erosão em ravinas e sua influência na produção de sedimentos nas bacias hidrográficas, identificando os principais mecanismos atuantes, através de estudos já desenvolvidos;

- Desenvolver relações analíticas que permitam o estabelecimento das condições críticas do mecanismo de alargamento lateral de ravinas e a condição básica para o início desse mecanismo, através da análise de estabilidade das paredes laterais das mesmas, levando-se em consideração a variação das condições físicas do solo provocadas pela variação do teor de umidade devida à infiltração durante as

chuvas ou outros processos:

- Estabelecer uma metodologia para previsão do tempo de ruptura das paredes laterais, derivada do mecanismo de infiltração da água no solo;

- Avaliar a influência das fendas de tração e do lençol freático como fatores aceleradores do processo de ruptura.

É importante salientar, que a metodologia básica adotada para o desenvolvimento das equações poderá ser aplicada em qualquer região. Entretanto, as variáveis físicas do solo e hidrometeorológicas deverão corresponder às condições reais de cada local. Os modelos, porém, são limitados às condições médias adotadas, devido a simplicidade desejável para o tratamento analítico geral.

Muito embora o método proposto neste trabalho tenha suas limitações, a simplicidade e praticabilidade do mesmo torna-o útil para os estudos de previsão e fornecem um meio de se avaliar a susceptibilidade do solo ao processo do alargamento lateral, o que é útil ao planejamento do uso, conservação e manejo do solo em áreas sujeitas ao problema do ravinamento.

2 - EROSIÃO SUPERFICIAL E A EROSIÃO EM RAVINAS

2.1 - Aspectos Gerais da Erosão Superficial

A erosão é o mecanismo de desprendimento ou remoção que se processa com o solo, rochas ou pedras na superfície terrestre (Vanoni, 1975). Ellison (1974), definiu a erosão como "um processo de desprendimento e transporte das partículas sólidas pelos agentes erosivos". Os principais agentes erosivos naturais são o vento, a água, o gelo e a gravidade, sendo a água e a gravidade os mais importantes na maioria dos casos.

A erosão do solo pode ser classificada de duas maneiras: (a) pela natureza do processo e (b) pelo modo, tipo ou origem. Na primeira classificação encontram-se a erosão geológica ou natural e a erosão acelerada. Na segunda podem ser citadas a erosão pelo impacto da chuva, a erosão laminar, a erosão em pequenos córregos e a erosão em ravinas. Nesta última classificação, os três primeiros processos constituem a erosão superficial comumente tratada na literatura como erosão laminar. Nesta forma de erosão, a precipitação e o escoamento superficial resultante são os agentes mais importantes. Um tratamento detalhado sobre a erosão laminar pode ser encontrado nos estudos de Lopes (1980), Lopes e Srinivasan (1981; 1982) e Srinivasan e Lopes (1982). O último processo, a

erosão em ravinas, representa o estágio mais avançado da erosão do solo. O escoamento superficial e a gravidade são os agentes mais importantes deste estágio. Esta forma de erosão tem sido identificada em diferentes regiões sob diferentes climas, solos, relevo e cobertura vegetal, podendo ser encontrada diferentes denominações. Nos Estados Unidos (EUA) são denominadas "gullies", encontrando-se, também, os termos "arroyo" e "valley trench" (Peterson, 1950). No Brasil as grandes ravinas são conhecidas por "vossorocas" ou "boçorocas" (Pichler, 1953; Prandini, 1974; Fiori e Soares, 1976). Sua ocorrência é predominante nas regiões Sul, Sudeste e Meio Oeste, em formações arenosas de baixa resistência, denominadas formações cenozóicas ou neo-cenozóicas (Prandini, 1974, 1975; Rodrigues, 1984). As precipitações anuais nestas regiões variam de 1200 mm a 1500 mm e a vegetação é do tipo floresta tropical e cerrado (Prandini, 1985). Em Madagascar duas denominações são atribuídas às ravinas: os "lavaka" (Rougerie, 1966; Petit e Bourgeat, 1966) e os "sakasaka", sendo estas últimas, segundo Rossi e Salomon (1979), ravinas estreitas e alongadas. Os lavaka são encontrados na parte central da ilha, em relevos bastante acentuados variando de 1200 m a 1500 m de altitude, em solos avermelhados com predominância de migmatitos, gnaisses e micaxistos, sendo a precipitação anual da ordem de 1200 mm e a vegetação do tipo savana (pasto) (Rougerie, 1966; Petit e Bourgeat, 1966). Os sakasaka são encontrados em relevos sub-horizontais, em solos caracterizados por sedimentos recentes e soltos ao Sul e por solos de rochas alteradas ao Norte, onde a

precipitação anual varia de 400 mm a 1300 mm; a vegetação é do tipo floresta (Prandini, 1985). Em Angola, as ravinas são denominadas "barrocas", sendo encontradas em áreas de baixo relevo e solos de grande erodibilidade, sob um regime de baixas precipitações (Nascimento, 1952).

A origem da formação das ravinas tem sido considerada pelos pesquisadores sob dois aspectos. O primeiro diz respeito à erosão acelerada causada pelo uso inadequado da terra nas atividades de construção de rodovias, de urbanização, agro-pastoris e outras, com a intervenção do homem. O segundo aspecto, baseado em observações de áreas erodidas e sedimentadas, trata do processo cíclico da formação e sedimentação das ravinas devido às severas mudanças no clima e no regime hidráulico dos cursos d'água (Peterson, 1950; Daniels, 1966; Ruhe, 1967; Blong, 1970; Prandini, 1974, 1975; Iwasa e Prandini, 1980). As condições climáticas e físicas do solo e a história, passada e presente do uso da terra, são fatores importantes na determinação e localização de severos eventos de erosão. Segundo Piest et al (1975), embora esses aspectos sejam admissíveis, os estudos do desenvolvimento histórico e geológico das ravinas trazem benefícios apenas qualitativos pois, os mecanismos que afetam a erosão em uma região podem ser diferentes em outras. A identificação destes mecanismos torna-se, portanto, uma ferramenta importante para melhor se compreender e se fazer uma análise do fenômeno.

2.2 - Causas e Mecanismos da Erosão em Ravinas

Segundo Piest et al (1975), as ravinas desenvolvem-se devido: (a) às forças exercidas pelo escoamento sobre as superfícies das margens e do leito dos canais de drenagem; (b) ao transporte do solo depositado no leito e (c) à ruptura das paredes dos canais pelo incremento do peso da massa de solo devido à infiltração da água. As ravinas originam-se basicamente da concentração do escoamento superficial proveniente das chuvas. A concentração do escoamento tem, naturalmente, aumentado as taxas de erosão superficial e em ravinas. Entretanto, o escoamento tem sido aumentado em muitos casos devido às atividades do homem na utilização do solo. Tais aumentos no deflúvio decorrem da construção de estradas e rodovias, construção de sistemas de drenagem de estradas, cultivos inadequados, sulcos mal projetados que se transformam em pontos favoráveis à concentração do fluxo, sistematização não eficiente do solo e principalmente, o desmatamento. Em muitos casos, as ravinas se desenvolvem até mesmo onde não há pontos favoráveis à concentração do escoamento, devido principalmente a falta de conservação do solo.

A intensidade das chuvas, a natureza do solo e suas condições com respeito ao teor de umidade e resistência, a declividade e a cobertura vegetal são fatores que afetam o escoamento, sua natureza, seu regime e conseqüentemente o grau de severidade da erosão. As chuvas de grande intensidade causam, geralmente, maiores danos que as chuvas de baixa ou média intensidade, visto que superam muito rapidamente a

capacidade de infiltração do solo, acelerando o início do escoamento.

Os declives naturais do solo exercem papel importante no incremento da energia e na concentração do escoamento. Declives mais acentuados promovem escoamentos com maior energia cinética e aumentam o pico do fluxo, pela diminuição do tempo de concentração.

Essas importantes variáveis favorecem de forma significativa a concentração do escoamento e conseqüentemente o aprofundamento do solo, podendo iniciar ravinas, dependendo da natureza do solo e da sua susceptibilidade à erosão.

As condições físicas do solo são altamente importantes no desenvolvimento das ravinas. Segundo Ireland et al (1939) e Lopes (1980), a erodibilidade dos solos ou a sua susceptibilidade à erosão dependem da estrutura, estratificação, permeabilidade, do teor de umidade, textura, composição mecânica, do tipo e extensão da cobertura vegetal e declividade do terreno. Todos estes fatores, são reguladores da resistência natural do solo, geralmente expressa pela coesão e pelo ângulo de atrito interno. Desde que a coesão e o ângulo de atrito interno reduzem-se com o incremento da umidade, o desenvolvimento das ravinas pela ruptura das paredes está diretamente associado à variação da resistência com o teor de umidade do solo. A infiltração da água no solo devida à precipitação altera a sua umidade e resistência, influenciando diretamente no processo de ruptura. A posição natural do nível freático é também um fator importante que afeta a resistência do solo, principalmente pela sua

localização nas imediações da base das paredes da ravina, provocando a saturação instantânea do solo e diminuindo sua resistência até o seu valor mínimo.

A cobertura vegetal exerce um papel importante nos processos do escoamento superficial, da infiltração e conseqüentemente da erosão do solo. Os solos com presença de material orgânico e coloides de origem vegetal, são mais resistentes que os solos arenosos cuja coesão praticamente não existe. Os solos cobertos têm uma menor erodibilidade do que os solos nus. Entretanto, Segundo Ireland et al (1939), quando esta proteção é afetada e o processo de alargamento por ruptura se inicia, a vegetação superficial tem influido muito pouco. Isto deve-se ao fato de que quando a erosão em ravinas atinge um certo estágio, a cobertura vegetal não exerce nenhuma influência como fator de retenção do processo de escavação da base da parede da ravina. Nestes casos, a erosão da base das paredes da ravina, pelo escoamento, provoca o desequilíbrio da parede e conseqüentemente a sua ruptura.

Todas essas causas concorrem para o processo de erosão em ravinas, principalmente pela ruptura das paredes laterais dos canais de drenagem, produzindo grandes quantidades de sedimentos, bastante susceptíveis de serem transportados e depositados em outros locais à jusante da bacia contribuinte.

O processo de erosão em ravinas desenvolve-se, de um modo geral, semelhantemente em quase todas as áreas onde ocorre o fenômeno. De acordo com Woodruff (1935), Ireland et al (1939), Daniels (1966) e Fiori e Soares (1976), quatro fases caracterizam a evolução das ravinas: 1) a erosão

vertical; ii) a ruptura das paredes da ravina; iii) a regularização natural e iv) a estabilização. As duas primeiras fases constituem as etapas de erosão ativa e as duas últimas, as etapas de atenuação e fim do processo.

A primeira fase, a erosão vertical, resulta da concentração do escoamento superficial formando inicialmente, pequenos córregos (rills). Se o material é de baixa resistência estes pequenos canais se aprofundam no substrato a cada evento climático sucessivo e, a menos que sejam controlados, formam a partir de uma dada profundidade, ravinas que progridem lateralmente e longitudinalmente para montante da bacia de contribuição.

Uma vez atingida uma certa profundidade no substrato do solo, as paredes laterais tornam-se íngremes. A ação conjunta das forças do escoamento e da força da gravidade, provocam o rompimento das paredes da ravina caracterizando o alargamento pela ruptura. Segundo Ireland et al (1939) e Bradford et al (1978) o reinício do mecanismo de ruptura da parede depende do seguinte ciclo: i) remoção e transporte do material acumulado no leito das ravinas, oriundo da ruptura; ii) diminuição da resistência do solo pela infiltração; iii) ruptura das paredes e iv) reinício do ciclo.

O rápido desenvolvimento da segunda fase depende basicamente das condições físicas do solo e das condições hidrometeorológicas. Se o escoamento não tem força trativa suficiente para transportar o solo acumulado no leito, o ciclo de ruptura poderá ser impedido. Segundo Ireland et al (1939), Bradford et al (1973), Bradford et al (1978) e Piest et al

(1975), não havendo ocorrência de grandes precipitações nem de escoamentos que transportem o solo acumulado no leito, o desenvolvimento das ravinas é impedido. Deste modo, inicia-se a regularização natural pela deposição do solo devida a erosão laminar.

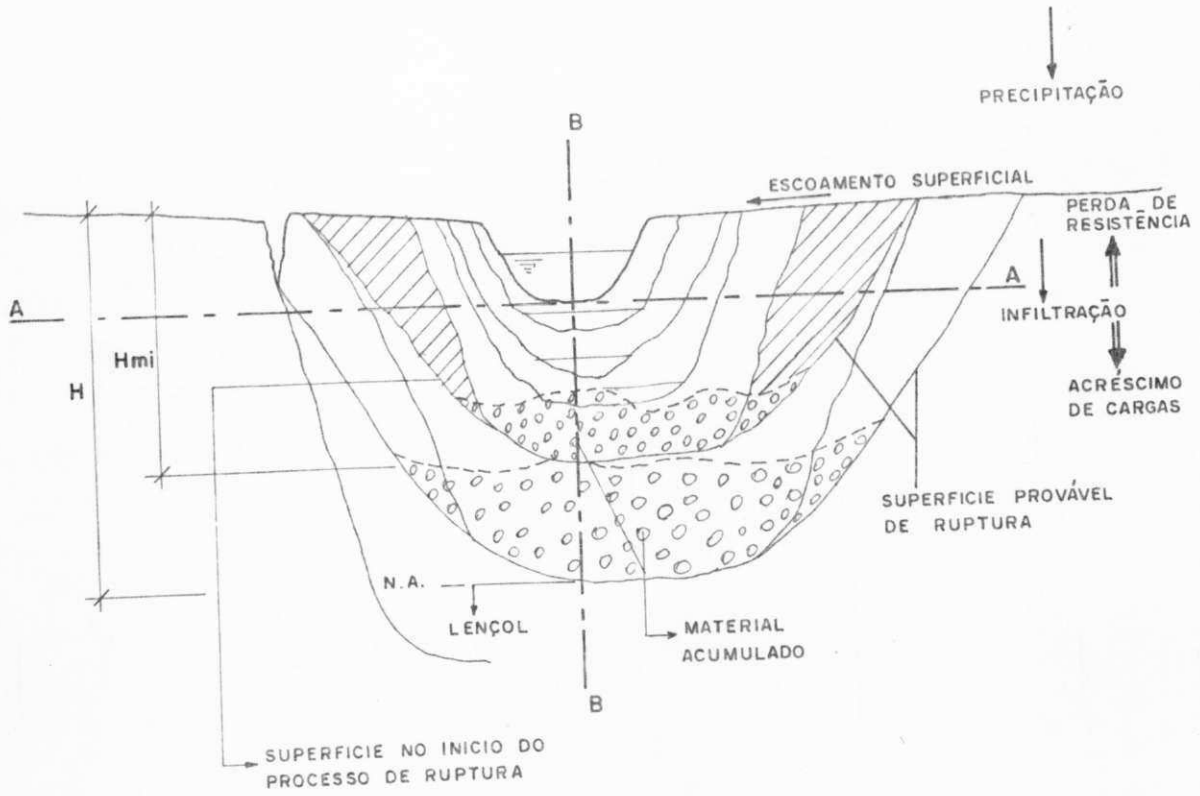
A estabilização ou o fim do processo de erosão em ravinas é o resultado do desenvolvimento completo da fase anterior. Com o material originado da ruptura são trazidos, também, blocos de pedras, raízes, gramíneas, e pequenas plantas que de certa forma fornecem um grau de estabilidade à base da ravina. A vegetação natural tende a se desenvolver nos limites da ravina, bem como na superfície das margens e no leito, o ciclo de erosão é atenuado, as declividades das paredes tornam-se mais suaves e reduz-se, também, os picos de chelas com todos estes fatores, diminuindo a possibilidade de início de novos ciclos.

A Figura 2.1 é um esquema das fases da erosão em ravinas. A Figura 2.2 mostra o esquema observado por Prandini et al (1974) para a Boçoroca de Assis no Estado de São Paulo.

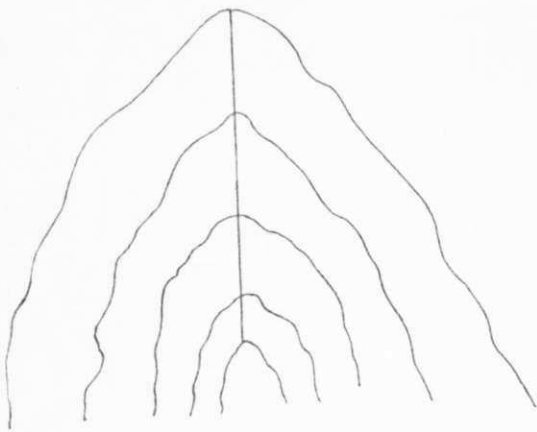
2.3 - Estudos Sobre os Fatores de Influência

O mecanismo de alargamento lateral por ruptura, característico da segunda fase do desenvolvimento das ravinas, representa o estágio mais importante do processo. Muitos fatores têm contribuído para o desenvolvimento desta fase.

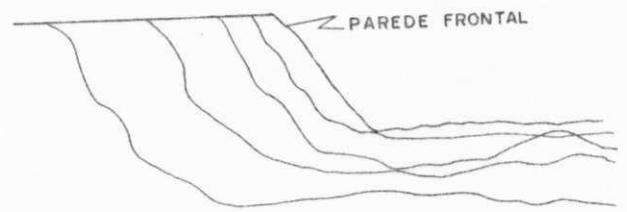
Ireland et al (1939), verificaram em algumas ravinas de grandes proporções geométricas no Condado Spartamburg na



(a) - Erosão vertical e ruptura das paredes laterais da ravina.



(b) - Corte AA - Vista em Planta.



(c) Corte BB - Vista em Perfil.

Fig. 2.1 - Fases do processo de erosão em ravinas.

ESTAÇÃO DE SECAS { Predominancia de erosão interna - Estabilidade das paredes ligeiramente afetada - Material saturado e material oriundo da ruptura acumulados na base das paredes.

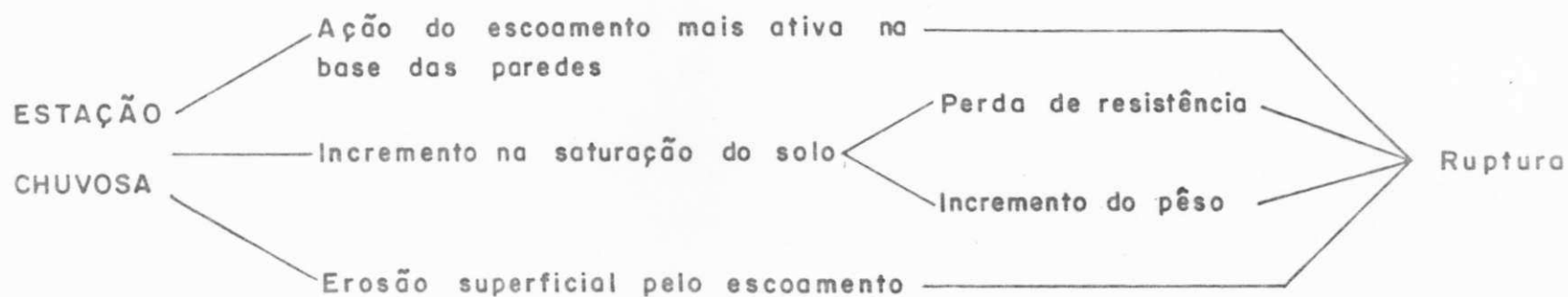


Fig. 2.2 - Esquema do processo de erosão em ravinas observado na Boçoroca de Assis, SP.

[Fonte: Prandini et al (1974)]

Carolina do Sul (EUA), que o escoamento superficial proveniente da bacia de contribuição dividia-se em duas partes ao atingir os limites das ravinas. Eles verificaram que uma parcela do escoamento caía em queda livre e a outra adería à parede frontal das ravinas. A energia de fluxo na queda livre promovia a formação de buracos no leito da ravina enfraquecendo o material na base das paredes, enquanto a fina película, aderida à parede frontal devido a tensão superficial, contribuía para a erosão da parede formando cavidades nas camadas menos resistentes do solo, deixando a parede numa condição instável. Cavidades formadas pelas forças do escoamento subsuperficial foram também observadas em alguns casos. Entretanto, verificações mais minuciosas mostraram que a frequência dessas formações não era significativa e em geral a erosividade da película aderida à parede da ravina era muito maior do que a do fluxo subsuperficial.

O surgimento de fendas na superfície do solo, devido às forças de tração no mesmo, foi observado em diferentes locais. Estas fendas podem influir no processo de alargamento lateral tanto estruturalmente quanto como fator de aceleração do processo de infiltração da água no solo, facilitando a sua rápida saturação. O efeito natural climático de saturação e secagem do solo, bem como o alívio de pressões devido ao carreamento do solo acumulado na base das paredes, contribuem para o aumento gradual dessas fendas, o que torna o solo muito susceptível à ruptura.

Os estudos sobre o processo de alargamento lateral de

ravinas, com o objetivo de identificar os fatores mais importantes, são poucos e relacionam esse mecanismo, em termos das taxas de avanço da parede frontal ou em termos do incremento na área afetada pelo fenômeno, às condições hidrológicas, de solo, topográficas e geométricas.

Um estudo feito por Beer e Johnson (1963) na bacia Steer Creek, localizada em Harrison, Iowa (EUA), correlacionou o aumento da área erodida com os parâmetros físicos da bacia, características geométricas das ravinas, um fator de chuva e um índice de escoamento. Através de análises estatísticas, o melhor ajustamento foi obtido com um modelo linear utilizando os logaritmos das variáveis. Eles identificaram na análise que os fatores mais significativos no desenvolvimento das ravinas naquela região foram a precipitação, um índice de escoamento, a área sistematizada em terraços, o comprimento da ravina no início do período e a distância entre o final da ravina e o divisor da bacia. Thompson (1964), usando 210 registros de progressão longitudinal em termos da taxa de avanço da cabeceira, registrados em 7 diferentes regiões dos Estados Unidos, correlacionou-os com os parâmetros das bacias, com as características topográficas, com a precipitação e com as características do solo. Os resultados obtidos através de um modelo logarítmico, mostraram que os fatores que mais influenciaram nas taxas de avanço foram a área de drenagem da ravina, a declividade do canal de acesso à montante da cabeceira, a soma das precipitações em intervalos de 24 horas, iguais ou maiores a 0,5 polegada no período considerado e um fator do solo representado pela porcentagem de argila na

camada de avanço da ravina. Testes de sensibilidade feitos por ele revelaram que a altura da ravina não tinha nenhuma significância no processo de avanço da cabeceira. A declividade do canal de acesso mostrou-se bastante questionável quanto a sua significância no processo. Esses resultados, entretanto, não são conclusivos do ponto de vista físico, visto que a altura da ravina é um fator altamente significativo no processo de ruptura e a declividade é importante na determinação da energia do escoamento. O Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (1966) utilizando os mesmos dados de Thompson definiu as taxas de avanço da cabeceira como uma função apenas da área de drenagem e da precipitação e enfatiza a importância de características geométricas, tais como altura, largura e gradiente topográfico, no processo de progressão das ravinas. Seginer (1966), baseado em diversos trabalhos sobre o desenvolvimento das ravinas, concluiu que as taxas de avanço da cabeceira das mesmas eram estreitamente relacionadas com a área de drenagem da ravina, elevada a um expoente relativo às características climáticas, topográficas e ao manejo do solo. Piest et al (1975), correlacionaram a descarga de sedimentos em ravinas com o escoamento superficial em duas bacias localizadas em Treynor, Iowa (EUA). Utilizando as diferenças entre as descargas de sedimentos medidas à jusante e à montante da cabeceira das ravinas eles observaram que os resultados de 7 anos de observações indicaram uma estreita relação entre a descarga de sedimentos e a descarga líquida. Uma análise estatística empregada para avaliar a significância de

diferentes fatores, tais como umidade média do solo, incremento na umidade devido a precipitação, picos de cheias, nível freático, mudanças no nível freático devido às chuvas e outros, mostrou resultados pouco animadores. Bradford et al (1973) analisaram o desenvolvimento lateral e longitudinal das ravinas através de um procedimento físico, baseado na análise da estabilidade de paredes de ravinas. Eles avaliaram fatores tais como, ângulo de atrito interno do solo, taxas de infiltração e fendas de tração, sob condições de solo saturado. Os resultados mostraram que a estabilidade é sensivelmente afetada pela variação do ângulo de atrito interno do solo e que as forças resistentes do mesmo, diminuem com o aumento das taxas de infiltração. O efeito das fendas de tração como fator influente na estabilidade, não foi significativo. Eles concluíram que três fatores são altamente importantes na análise da estabilidade: a posição do nível freático, a coesão do solo e a taxa de infiltração da água no solo. Bradford e Plest (1977), mediram as características físicas do solo numa bacia em Treynor, Iowa (EUA) e sob condições controladas do nível freático, avaliaram a estabilidade das paredes da ravina. Uma rede de piezômetros e tensiômetros cuidadosamente instalada permitia a leitura das pressões positivas e negativas no interior do solo. Eles concluíram que as forças exercidas pela água no interior do solo parecem ter um menor papel no processo de ruptura e que o entendimento da mecânica da ruptura depende de como variam os parâmetros de resistência do solo com o teor de umidade. Estudos feitos por Rodrigues (1984) em diversas amostras

indeformadas, coletadas em várias boçorocas do Estado de São Paulo, mostraram uma redução significativa dos parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito interno) com o incremento no grau de saturação, quando comparadas com aquelas ensaiadas sob condições naturais. Ciclos de saturação e secagem foram provocados em algumas amostras e o surgimento de fendas de tração foi observado após dois ciclos. Rodrigues conclui que a redução da resistência do solo pelo incremento no grau de saturação do mesmo, o arraste das partículas do solo pelas forças do escoamento subterrâneo e as fendas de tração, são os fatores mais importantes no processo de evolução das boçorocas.

Embora as fases do desenvolvimento das ravinas tenham sido verificadas em diferentes áreas sob condições diversas, pode ocorrer que em outras áreas os mecanismos não se desenvolvam completamente. Entretanto, quase que numa regra geral, a literatura tem indicado que, quando o desenvolvimento da ravina atinge a segunda fase - a ruptura das paredes - o processo de diminuição da resistência natural do solo devido ao aumento do grau de saturação pelas chuvas, é um dos fatores mais significativos no mecanismo de alargamento lateral. Esta evidência é reforçada pelos estudos de Handy (1973), Bradford e Piest (1977), Piest et al (1975), Rodrigues (1984), Rodrigues e Vilar (1984) e Leopold et al (1964).

2.4 - Produção de Sedimentos nas Ravinas

Alguns trabalhos foram desenvolvidos com respeito à

quantificação da erosão do solo nas ravinas. Embora estas informações sejam relativamente escassas, os registros mostram claramente a influência significativa da erosão das ravinas na produção de sedimentos nas bacias hidrográficas. Glymph (1951) e Leopold et al (1964) observam que a quantidade total de sedimentos originados nas ravinas é muito grande, embora geralmente menor do que aqueles de origem laminar. Gottschalk e Brune (1950), entretanto, baseados em medidas de campo e através de fotos aéreas indicam as ravinas como possivelmente as maiores fontes de sedimentos em algumas bacias. Registros relatados por Gong e Xiong (1980) e por Mou e Meng (1980) citados por Walling (1983), para a bacia do Rio Amarelo na China, são uma confirmação das indicações de Gottschalk e Brune. Entretanto, segundo Walling (1983) tais registros são atribuídos a ação predominante da erosão em ravinas na bacia do Rio Amarelo. Estudos comparativos feitos por Dvorak e Heinemann (1967) mostraram, através de um programa de amostragem de cursos d'água na bacia Dry Creek no Oeste de Nebraska (EUA), que 68% da carga de sedimentos que passaram na estação de medição, durante 2 anos de precipitação acima da normal (1951 e 1952), provinha do vale principal das ravinas. Para os anos menos chuvosos (1952-1956), as observações indicaram uma redução no percentual, caindo para 14,6%. Observações feitas por Piest e Spomer (1968) utilizando as diferenças entre concentrações medidas à jusante e à montante da cabeceira das ravinas em duas bacias em Treynor, Iowa (EUA), mostraram que a porcentagem da produção de sedimentos nas ravinas, em 2 anos, foi da ordem de 20% da produção total.

Essa porcentagem foi mantida nos estudos subsequentes feitos por Piest et al (1975) nas mesmas bacias. Uma estimativa feita por Miller et al (1962) para a bacia Pigeon Roost Creek, uma sub-bacia do Rio Yazoo no Mississippi (EUA), mostrou uma variação na erosão das ravinas de 4% a 57% da produção total. Num gráfico dessas porcentagens, calculadas em treze ravinas da sub-bacia, ficou evidenciada uma diminuição da produção com o crescimento da área de drenagem. Isto ocorreu, segundo eles, devido ao acréscimo de terras não atingidas pelas ravinas com o crescimento da área. Brice (1966), quantificou a produção de sedimentos em 216 ravinas na bacia Dry Creek no Oeste de Nebraska (EUA) através de fotos aéreas como sendo 81,4 mil metros cúbicos num período de 15 anos (1937 a 1952). Segundo citação de Piest e Spomer (1968), isto representa 6% da produção anual média.

A quantidade de sedimentos provenientes das ravinas apresenta-se altamente variável. Peterson (1950) cita uma produção da ordem de 24,7 milhões de metros cúbicos, para um período de 30 anos, proveniente da ravina San Simon na bacia do Rio Gila no Arizona (EUA). Um volume de sedimentos da ordem de 487,3 milhões de metros cúbicos, registrado num período de 42 anos numa ravina da bacia do Rio Puerco, um tributário do Rio Grande no Novo México, foi relatado por Bryan (1928). Cálculos feitos por Rodrigues (1984) a partir de levantamentos topográficos em um ramo de quarta ordem da Boçoroca de Descalvado na região Centro-Leste do Estado de São Paulo, mostraram que 80 mil metros cúbicos de sedimentos erodiram, apenas daquela ramificação, durante um período de 4

anos e 6 meses. Miller et al (1962) utilizando estruturas de acumulação à jusante das ravinas da bacia do Rio Yazoo no Mississippi (EUA), registraram uma produção de sedimentos variando de 606 a 1.823,3 toneladas por hectare, por ano, para as ravinas sem qualquer proteção localizadas em três áreas de estudo, durante 5 anos de observações. Tal produção foi associada ao relevo das ravinas e a erodibilidade do material exposto. Beer, citado por Piest e Spomer (1968), estimou em 25,9 toneladas por hectare por ano a produção de sedimentos nas ravinas localizadas na bacia Steer Creek no Oeste de Iowa (EUA), durante um período de 20 anos (1942 a 1962). Esta produção caiu para 4,9 toneladas entre 1962 e 1963 e foi menor do que este valor entre 1964 e 1967.

As medidas quantitativas que levam em consideração as características evolutivas das ravinas (progressão lateral e longitudinal) são também consideradas em alguns estudos. Ireland et al (1939) mediram taxas de progressão em termos do avanço linear da cabeceira de várias ravinas localizadas em Spartamburg na Carolina do Sul (EUA). As taxas observadas, mostraram avanços variando entre 0 (zero) e 15 metros, num período de 2 a 978 dias. Segundo eles, as chuvas excepcionais foram responsáveis pelas taxas mais significativas observadas. Piest et al (1975) e Bradford et al (1978) mostraram uma vista plana da evolução de uma ravina numa bacia em Treynor, Iowa (EUA), em termos do incremento da área afetada pela ravina. Estas taxas, registradas durante os anos de 1964 a 1974, apresentadas por Bradford et al (1978) mostram uma variação entre 11 e 275 metros quadrados dependendo do escoamento

superficial gerado por cada evento de chuva. O avanço total no período considerado foi da ordem de 54 metros. Mapas topográficos apresentados por Rodrigues (1984) evidenciaram uma progressão linear da ordem de 140 metros em um ramo da boçoroca de Descalvado na região Centro-Leste do Estado de São Paulo num período de 4 anos e 6 meses.

Todos os estudos sobre a produção de sedimentos nas ravinas têm mostrado que as mesmas contribuem de maneira significativa para a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas, mas são altamente variáveis de uma região para outra. As condições naturais associadas às condições aceleradas, têm promovido a erosão do solo e têm produzido grandes quantidades de sedimentos nas bacias hidrográficas.

Os efeitos da erosão do solo são altamente danosos. A erosão do solo reduz a fertilidade e a produtividade removendo as camadas férteis nas quais se encontram os minerais vitais à vida. O solo carregado traz poluentes, hoje tão comumente usados na agricultura, contaminando as fontes principais de abastecimento, além de se depositarem no leito dos cursos d'água e reservatórios, diminuindo a capacidade da secção e de armazenamento.

A erosão em ravinas, embora geralmente produza menores quantidades de sedimentos que a erosão laminar, a longo prazo, são mais prejudiciais a curto prazo. O estrago em rodovias e estradas, o solapamento de encostas naturais, a destruição de sistemas naturais de drenagem e canais de irrigação, a destruição de sistemas de cultivo e muitos outros, são efeitos altamente danosos que afetam diretamente às comunidades e o

seu planejamento racional.

Os efeitos da erosão do solo, de um modo geral, são muito variáveis no tempo e no espaço e podem causar danos irreparáveis, principalmente aos recursos não renováveis, e dependem basicamente da quantidade e da natureza dos processos de erosão, transporte e deposição. Reduzir os efeitos dos processos de erosão do solo é, portanto, um dos objetivos principais dos pesquisadores e isto só poderá ser feito, conhecendo-se bem os mecanismos do ravinamento e transformando estes mecanismos em relações básicas que avaliem suas condições incipientes. Estudos específicos que visam estabelecer os mecanismos locais que afetam o desenvolvimento das ravinas são importantes e auxiliam na determinação das medidas mais adequadas para a prevenção e para o controle. A análise física do processo de erosão em ravinas é muito complexa, devido aos vários fatores que influem no processo. Entretanto, este meio parece ser o mais seguro e auxilia na procura de eventuais soluções para os problemas locais. O processo de erosão em ravinas, embora bem estudado qualitativamente, não tem sido transformado em relações quantitativas baseadas no conhecimento dos mecanismos deste processo. Quaisquer relações desenvolvidas nesse sentido, seriam muito úteis para os estudos de previsão.

2.5 - Equações de Previsão de Erosão em Ravinas

De um modo geral, os modelos de previsão da erosão do solo são importantes e possibilitam a estimativa da magnitude

do fenômeno, para uma dada área ou região, onde não se dispõe de recursos para a instalação de uma infra-estrutura que permita a obtenção de registros através de medições sistemáticas.

O desenvolvimento de equações de previsão, da evolução das ravinas em termos de taxas de avanço da cabeceira ou do alargamento lateral, bem como em termos da produção de sedimentos, quantificada em volume ou em peso, vem sendo tentado por alguns pesquisadores ou mesmo através de programas de controle, principalmente nos países desenvolvidos. A primeira tentativa foi feita pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos em 1936 (Thompson, 1964), num programa de prevenção de cheias na bacia do "Little Sioux River" no Oeste de Iowa. Com base em observações de um sistema de 29 ravinas, foi proposto um modelo para previsão do crescimento populacional das ravinas do tipo "S" (Curva logística), onde a idade do sistema é um fator relevante. Outras relações desenvolvidas com base nas análises de regressão são também propostas. Exemplos deste tipo, levando em conta diferentes condições, são os de Beer e Johnson (1963) e de Thompson (1964). Equações simplificadas como a de Seginer (1966) e a do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (1966), que associa taxas futuras com taxas passadas, são também propostas empíricas encontradas na literatura.

Até o presente, os modelos propostos foram derivados com base na análise de regressão incluindo fatores tais como, área da bacia de contribuição, declividade do solo, características de chuva e de solo. Entretanto, a utilização destes

modelos em outras áreas deve ser feita com cautela, devido aos processos dominantes serem bem diferentes. Há ainda a grande limitação de que essas equações obscurecem importantes fatores interagindo no processo dificultando, por conseguinte, a compreensão de mecanismos importantes. Os modelos baseados no mecanismo físico da erosão em ravinas praticamente não existem na literatura. Algumas tentativas de se compreender o mecanismo de alargamento lateral das ravinas, nesse sentido, não levaram em consideração a variação das condições físicas do solo com a variação das condições climáticas locais. Modelos dessa natureza, mesmo que simplificados, são altamente importantes para melhor se entender os mecanismos principais da erosão em ravinas e se identificar os fatores mais relevantes, bem como permitem uma melhor avaliação das possíveis soluções que possam ser adotadas para as medidas de prevenção e controle.

2.6 - Estudos sobre as Medidas de Conservação e Controle

Poucos trabalhos sobre as medidas de conservação e controle da erosão em ravinas foram encontrados na bibliografia acessível. Em alguns casos, as medidas aplicadas mostraram-se eficientes. Piest et al (1975) compararam a produção de sedimentos em quatro bacias localizadas em Treynor no Oeste de Iowa (EUA), duas das quais com medidas de conservação, durante 7 anos. As práticas de conservação aplicadas em duas bacias (cultivo de milho em terraços e pasto rotativo), tiveram grandes efeitos na redução da produção de

sedimentos nas ravinas (em torno de 93%). Em contraste, observações feitas por Ireland et al (1939) nos seus estudos na Carolina do Sul (EUA) indicaram que os sistemas de terraços, aplicados numa tentativa de conter a erosão em ravinas, contribuíram para a formação de ravinas de grandes dimensões. Segundo eles, estes sistemas podem dar um certo grau de proteção ao solo se bem projetados e mantidos sob severo controle técnico. Miller et al (1962) compararam as produções de sedimentos em 15 ravinas sujeitas à várias medidas de conservação, localizadas em três áreas distintas na bacia do Rio Yazoo no Mississippi (EUA), com as produções de três ravinas sem nenhuma proteção. As observações de 5 anos mostraram que as medidas de proteção adotadas (revestimento da superfície das paredes das ravinas com diferentes materiais naturais) diminuíram a produção de sedimentos entre 33 a 84% dependendo do tipo de cobertura adotada. Já observações feitas por Peterson (1950) mostraram que, as medidas corretivas aplicadas nos vales do Oeste dos Estados Unidos, numa tentativa de reduzir o escoamento e a erosão em ravinas tiveram sucesso duvidoso.

Contrastes como esses evidenciados na literatura demonstram claramente a falta de estudos sobre a erosão em ravinas que levem em conta os fatores climáticos e físicos do solo, de modo que permita uma melhor compreensão do processo, bem como, torne possível a identificação de medidas de prevenção e controle adequadas, eficientes e econômicas.

3 - TRATAMENTO ANALÍTICO DO ALARGAMENTO LATERAL

3.1 - Aspectos Gerais do Problema

O alargamento lateral por ruptura, característico do desenvolvimento das ravinas, representa o processo mais significativo desta forma de erosão do solo. O escoamento superficial, a infiltração da água das chuvas e o lençol freático são os fatores que mais afetam esta fase da erosão. A erosão bruta, oriunda da ruptura das paredes laterais da ravina, resulta em grandes quantidades de solo, susceptíveis ao transporte pelo escoamento. A produção de sedimentos é o efeito subsequente e depende da capacidade de transporte do escoamento gerado pelos eventos de precipitação além de outros fatores.

As equações desenvolvidas neste capítulo referem-se tão somente ao processo do alargamento lateral não analisando o transporte posterior. Mesmo assim, as dificuldades em se analisar este processo são muitas devido à ação conjunta dos diferentes fatores que contribuem para o mecanismo do alargamento lateral. Sendo assim, a análise é feita estudando-se a influência de cada fator, isoladamente, no mecanismo. No tratamento analítico são utilizados os recursos da mecânica dos solos através dos quais é desenvolvida uma análise de estabilidade das paredes laterais de ravinas verificando-se a possibilidade da ruptura ocorrer pelo desequilíbrio entre as

forças ativas e as forças de resistência do solo.

A análise é fundamentada no conceito de que a erosão por ruptura ocorrerá quando as forças ativas superarem as forças resistentes do solo. Segundo Bradford e Piest (1977) as forças ativas são o peso da massa de solo e o peso da água adicionado pela infiltração e/ou elevação do nível freático. As forças resistentes são a coesão e o atrito interno do solo. De acordo com Zarub et al (1969), Berezantzev et al (1969), Jumikis (1967), Bradford e Piest (1977), e Bradford et al (1978), tanto a coesão como o ângulo de atrito interno dependem diretamente do teor de umidade do solo, diminuindo de valor com o incremento da umidade.

A análise de estabilidade é desenvolvida levando-se em consideração o efeito duplo do incremento de cargas ativas por um lado e a diminuição da resistência natural do solo por outro. São derivadas equações que estabelecem as condições críticas do mecanismo do alargamento a partir das quais pode-se estabelecer a erosão bruta da ravina. A condição inicial deste mecanismo é também estabelecida, além do que apresenta-se uma metodologia para a previsão do tempo de ruptura das paredes laterais a partir dos conhecimentos, já estabelecidos na Hidrologia, do mecanismo de infiltração da água no solo, como por exemplo pela utilização da equação de Horton.

Para o desenvolvimento das equações são feitas as seguintes suposições básicas, aplicáveis em todas as situações consideradas:

- O sistema não leva em conta a característica

tridimensional das ravinas, sendo considerado bidimensional. Segundo Bradford et al (1973), os erros cometidos ao se desenvolver uma análise para um sistema bidimensional são difíceis de serem avaliados e os estudos de campo, sobre erosão em ravinas, deveriam ser conduzidos de modo a que estabelecessem o grau de precisão ao se considerar o sistema bidimensional. Em face das incertezas e dos esforços que poderiam ser desprezados numa análise tridimensional, tal consideração pode, em princípio, ser prescindida:

- A massa de solo que compõe o sistema é normalmente consolidada, homogênea e composta de apenas um tipo de solo;

- O solo erode segundo uma superfície potencial de ruptura plana, passando pelo pé da parede da ravina. As superfícies de ruptura plana são, segundo Bradford e Piest (1977), uma característica da falha de paredes de ravinas. Segundo Jumikis (1967), a ruptura do solo, segundo uma forma qualquer, pode passar acima, no pé, ou abaixo do pé da parede do solo. A consideração aqui admitida é, também, uma conveniência para o desenvolvimento matemático das equações:

- A tensão de cisalhamento média no plano da falha é avaliada pela equação de Coulomb para solos com coesão e ângulo de atrito interno:

- A coesão do solo e o ângulo de atrito interno são funções do teor de umidade, avaliados pelas relações válidas para cada tipo de solo. Neste trabalho os resultados experimentais obtidos por Berezantzev et al (1969) para um tipo de solo bastante susceptível à formação de ravinas, o "loess", são utilizados no desenvolvimento das equações. Esta

consideração decorre do fato de não se ter encontrado relações para essas variáveis para os solos típicos do Brasil. De acordo com os resultados obtidos por Berezantzev et al (1969) nos seus estudos experimentais, para três variedades do solo tipo "loess", uma variação relativamente baixa, da ordem de 40%, foi verificada para o ângulo de atrito interno na faixa de variação da umidade natural até a umidade na saturação, enquanto que, para a coesão, a variação observada no mesmo intervalo da umidade foi muito alta, da ordem de 90%. É importante salientar, que estas variações foram obtidas para a faixa de maior concentração dos dados, cujo comportamento é aproximadamente linear como será apresentado mais adiante.

Outras considerações que se façam necessárias serão introduzidas durante o desenvolvimento das equações.

3.2 - Alargamento Lateral pela Infiltração

3.2.1 - O Sistema Considerado

A Figura 3.1 mostra o sistema adotado. Os elementos ali representados são definidos abaixo.

H - Altura da parede da ravina

L - Comprimento do plano de ruptura

B - Alargamento lateral

α - Ângulo da parede da ravina com a horizontal (graus)

ϕ - Ângulo de atrito interno do solo (graus)

θ - Ângulo do plano de ruptura com a horizontal (graus)

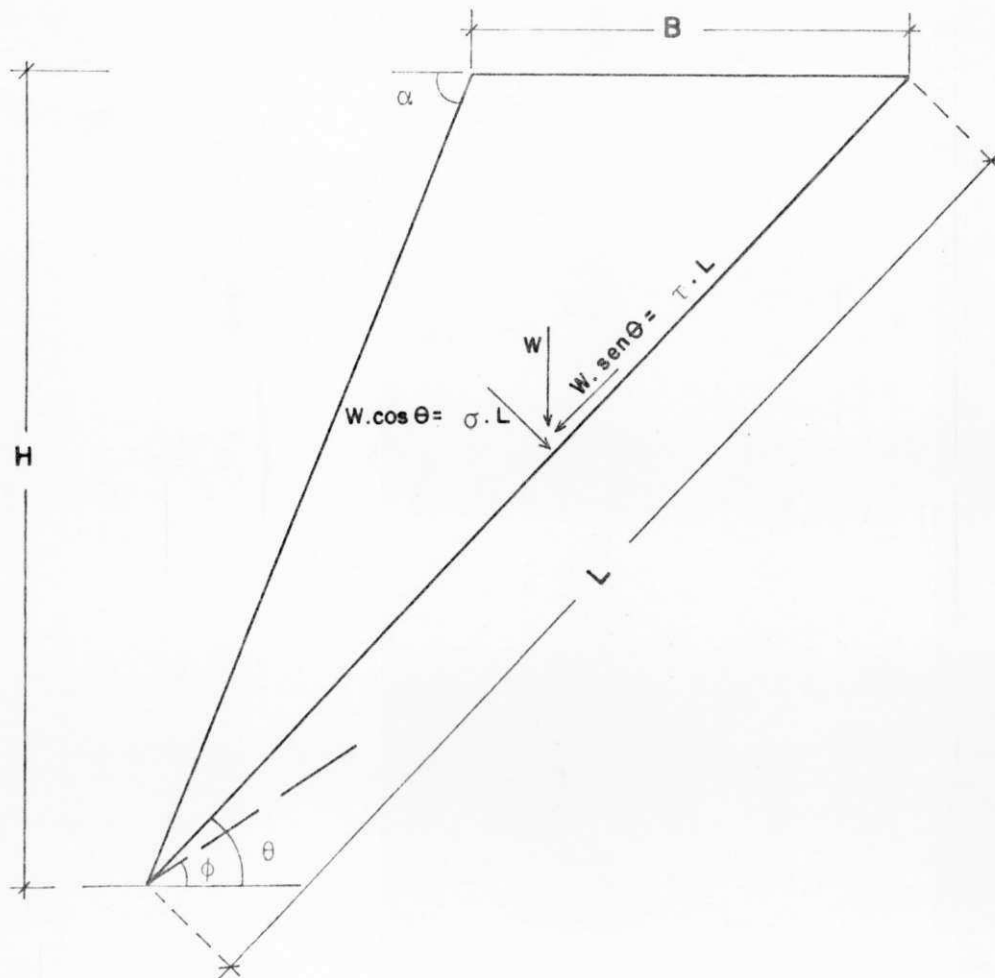


Fig. 3.1 - Sistema representativo da parede lateral da ravina.

As forças que atuam na massa de solo do sistema são representadas por:

W - Peso total do sistema (Força)

τL - Força de cisalhamento média (Força)

σL - Força normal média (Força)

onde τ e σ representam as tensões de cisalhamento e normal, médias, em unidades de força por unidade de área.

3.2.2 - Coesão Mínima Para a Estabilidade

As condições críticas no momento da ruptura são estabelecidas pelo equilíbrio entre as forças ativas e as forças de resistência sobre o plano de ruptura adotado. Para solos com coesão e ângulo de atrito interno, a tensão de cisalhamento média (τ) no plano de ruptura pode ser avaliada pela relação de Coulomb:

$$\tau = C + \sigma \tan(\phi) \quad (3.1)$$

onde C representa a coesão do solo em unidades de força por unidade de área.

Sendo o sistema adotado bidimensional, a área da superfície da falha é igual ao seu comprimento (L) para um comprimento unitário normal ao plano da figura. Deste modo, as componentes do peso, nas direções normal e tangencial ao plano de ruptura, divididas pela área do plano resultam nas tensões:

$$\sigma = W \text{ Cos}(\theta)/L \quad (3.2)$$

$$\tau = W \text{ Sen}(\theta)/L \quad (3.3)$$

sendo o peso total (W), igual a área de secção trasversal do sistema multiplicado pelo peso específico total do solo (γ_t), calculado por:

$$W = \gamma_t (1/2) H L \text{ Sen}(\alpha-\theta)/\text{Sen}(\alpha) \quad (3.4)$$

O peso específico total do sistema pode ser relacionado ao peso específico do solo seco (γ_s), ambos em unidades de força por unidade de volume, e ao teor de umidade do solo (U) em frações do peso, pela equação:

$$\gamma_t = \gamma_s (1+U) \quad (3.5)$$

Substituindo-se as equações (3.2) e (3.3), com a expressão do peso dada pela equação (3.4), na equação (3.1) e exprimindo-se o valor da coesão obtem-se:

$$C = \gamma_t (1/2) H \text{ Sen}(\alpha-\theta)\text{Sen}(\theta-\phi)/[\text{Sen}(\alpha)\text{Cos}(\phi)] \quad (3.6)$$

A equação (3.6) representa a mínima coesão que o solo deve ter para que não ocorra a ruptura, ou seja a coesão requerida para a estabilidade, segundo o plano de ruptura definido pelo ângulo θ .

3.2.3 - O Plano de Ruptura Crítico

O plano mais susceptível à ruptura é denominado plano de ruptura crítico, representado pelo ângulo (θ) . De acordo com Taylor (1963) sua determinação pode ser feita por tentativas ou analiticamente através do termo adimensional $(C/\gamma H)$ denominado "número de estabilidade". Para o plano de ruptura crítico este número é máximo. Adimensionalizando-se a equação (3.6) resulta que:

$$\frac{C}{\gamma H} = \frac{(1/2)\text{Sen}(\alpha - \theta)\text{Sen}(\theta - \phi)}{[\text{Sen}(\alpha)\text{Cos}(\phi)]} \quad (3.7)$$

Para a condição máxima, pode-se definir o plano crítico igualando-se a derivada primeira da equação (3.7) com respeito a (θ) , a zero, no que resulta:

$$\theta = \frac{(1/2)(\alpha + \phi)}{c} \quad (3.8)$$

onde ϕ é o valor do ângulo de atrito interno do solo na condição crítica da ruptura.

A equação (3.8) permite localizar o plano de ruptura crítico e avaliar, quantitativamente, o alargamento lateral (B) , a erosão bruta (E) em peso por unidade de extensão da ruptura (l) e ainda estabelecer a área superficial (A) afetada pela erosão. De acordo com a geometria do sistema, essas variáveis podem ser calculadas pelas seguintes relações:

$$B = H \frac{\text{Sen}[(1/2)(\alpha - \phi)]}{\text{Sen}(\alpha)\text{Sen}[(1/2)(\alpha + \phi)]} \quad (3.9)$$

$$E = \frac{\gamma}{b} \left(\frac{1}{2} \right) H L \frac{\text{Sen}[(1/2)(\alpha - \phi_c)]}{\text{Sen}(\alpha)} \quad (3.10)$$

$$A = \frac{B \ell}{s} \quad (3.11)$$

As equações (3.9), (3.10) e (3.11), definidas anteriormente, dependem do valor do ângulo de atrito interno crítico (ϕ_c) no momento da ruptura. Por outro lado, como as condições físicas do solo variam com a umidade presente, o ângulo de atrito interno depende da umidade presente no momento da ruptura, ou seja a umidade crítica.

3.2.4 - Umidade Crítica

A umidade necessária para provocar a ruptura da parede segundo o plano crítico, ou seja a umidade crítica, pode ser estabelecida analiticamente conhecendo-se a variação dos parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito interno) com a umidade. Como não foram encontradas estas relações para os solos típicos do Brasil, foram consideradas as relações experimentais obtidas por Berezantzev et al (1969) para três variedades do solo tipo "loess" encontradas na Rússia, conforme mostra a Figura 3.2. Essas relações são dadas na forma que se segue para a faixa cuja variação é linear:

$$C(u) = C_0 - A(U - U_0) \quad (3.12)$$

$$\phi(u) = \phi_0 - F(U - U_0) \quad (3.13)$$

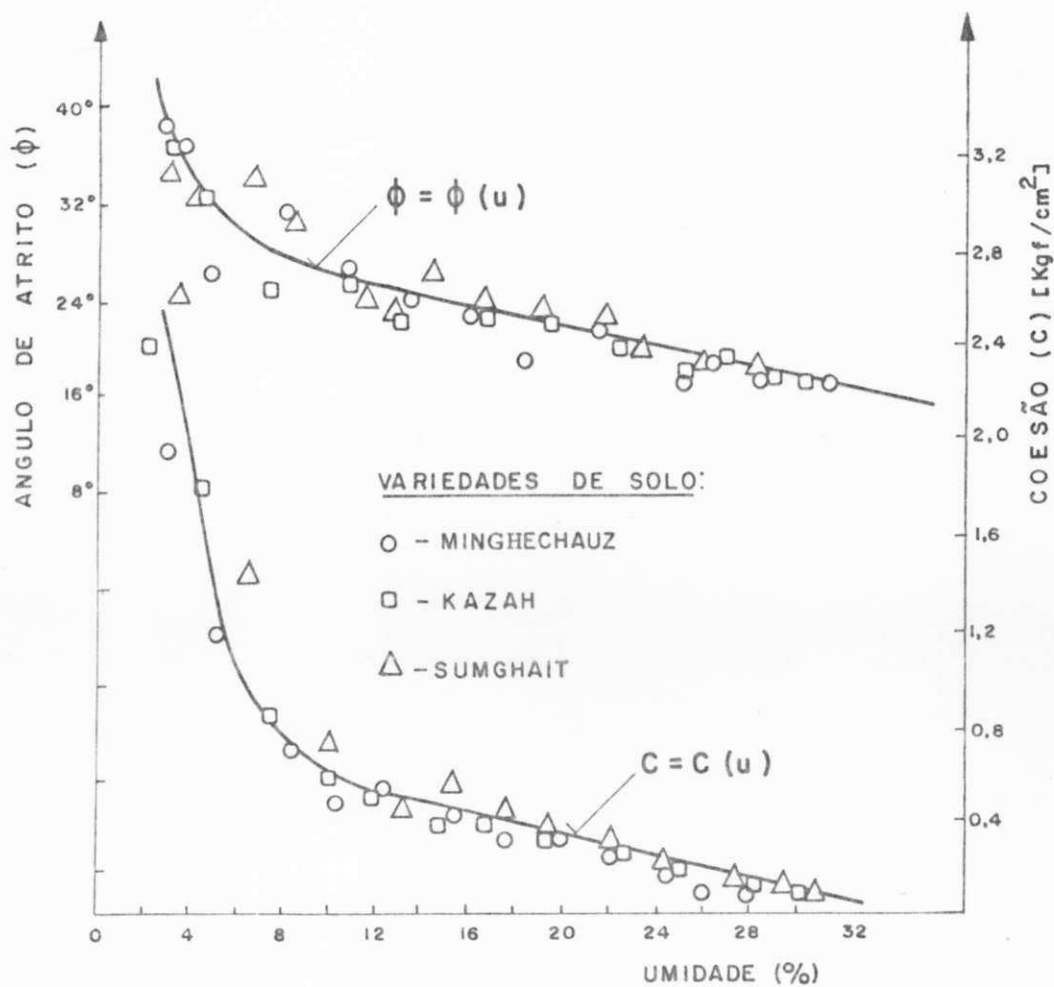


Fig. 3.2 - Variação da coesão e do ângulo de atrito interno em função da umidade para o solo tipo "Loess".

[Fonte: Berezantzev et al., 1969]

onde C_0 e ϕ_0 são a coesão e o ângulo de atrito interno do solo correspondentes ao teor de umidade natural (U_0), A e F representam as declividades das retas em cada caso, calculadas por $(C_0 - C_s)/(U_0 - U_s)$ e $(\phi_0 - \phi_s)/(U_0 - U_s)$ respectivamente e C_s e ϕ_s são a coesão e o ângulo de atrito interno do solo correspondentes ao teor de umidade na saturação (U_s).

Para o estabelecimento da umidade crítica será considerada, explicitamente, apenas a variação da coesão do solo (equação 3.12) por ser mais significativa que a variação do ângulo de atrito interno. No entanto, a variação do ângulo de atrito interno será levada em consideração, posteriormente, através de um processo iterativo simplificado que será apresentado no capítulo 4.

Combinando-se as equações (3.6) e (3.12) e resolvendo para a umidade chega-se a expressão:

$$U_c = (C_0 + A U_0 - D)/(D + A) \quad (3.14)$$

$$\text{onde } D = (1/4) \gamma_s H [1 - \cos(\alpha - \phi_c)] / [\sin(\alpha) \cos(\phi_c)] \quad (3.15)$$

A equação (3.14) quantifica a umidade crítica média, em frações do peso do solo (grama/grama), no plano de ruptura definido pela equação (3.8), sendo uma função da altura da parede da ravina.

3.2.5 - Início do Processo de Alargamento

Desde que o peso da massa de solo aumenta com a altura

da parede da ravina e que a umidade necessária para a ruptura varia com a altura da parede, pode-se esperar que a umidade crítica diminuirá com o aumento da altura e aumentará com a diminuição da altura da parede. Deste modo, se pode definir uma altura mínima, para a qual a umidade necessária é máxima. Assim, igualando a umidade crítica (U_c) à umidade na saturação (U_s) na equação (3.14) e exprimindo a altura chega-se a seguinte expressão:

$$H_{mi} = \frac{4 C_s \text{ Sen}(\alpha) \text{ Cos}(\phi_s)}{\{\gamma_s (1+U_s) [1-\text{Cos}(\alpha-\phi_s)]\}} \quad (3.16)$$

A equação (3.16) define a menor altura a partir da qual o processo de alargamento lateral por ruptura se inicia. Para valores de altura menores, o desenvolvimento das ravinas é essencialmente provocado pela ação do escoamento.

3.2.6 - Previsão do Tempo de Ruptura

A previsão do tempo de ruptura das paredes laterais de uma ravina depende, basicamente, das condições físicas do solo e das condições hidrometeorológicas locais. Desde que a umidade do solo está diretamente relacionada ao regime de precipitações, é possível se estabelecer, para um certo padrão de chuva, o tempo em que a ruptura ocorrerá.

A previsão do tempo de ruptura das paredes da ravina pode ser, assim, então obtida conhecendo-se a lâmina d'água correspondente à umidade crítica (U_c), definida pela equação (3.14), igualada com a lâmina d'água infiltrada, medida ou

calculada através da forma integrada da curva de capacidade de infiltração típica do solo.

No presente desenvolvimento, será considerada como curva típica, representativa da capacidade de infiltração do solo, a curva de Horton (Figura 3.3).

Para uma amostra de solo como é mostrada na Figura 3.4, o grau de saturação do mesmo (S) pode ser calculado pela relação seguinte:

$$S = Q/(\eta h) \quad (3.17)$$

onde Q é o volume de água infiltrada por unidade de área, η é a porosidade do solo em frações do volume total e "h" é o volume total por unidade de área na superfície.

O grau de saturação expresso em função do teor de umidade pode ser calculado por:

$$S = G U/\epsilon \quad (3.18)$$

onde G é a densidade dos grãos e ϵ o índice de vazios do solo em frações do volume de sólidos.

Combinando-se as equações (3.14), (3.17) e (3.18), pode-se definir a lâmina d'água correspondente à umidade crítica como sendo:

$$Q = \{G h/(1+\epsilon)\} [(C + A U - D)/(D+A)] \quad (3.19)$$

O tempo de ruptura pode ser estabelecido conhecendo-se o

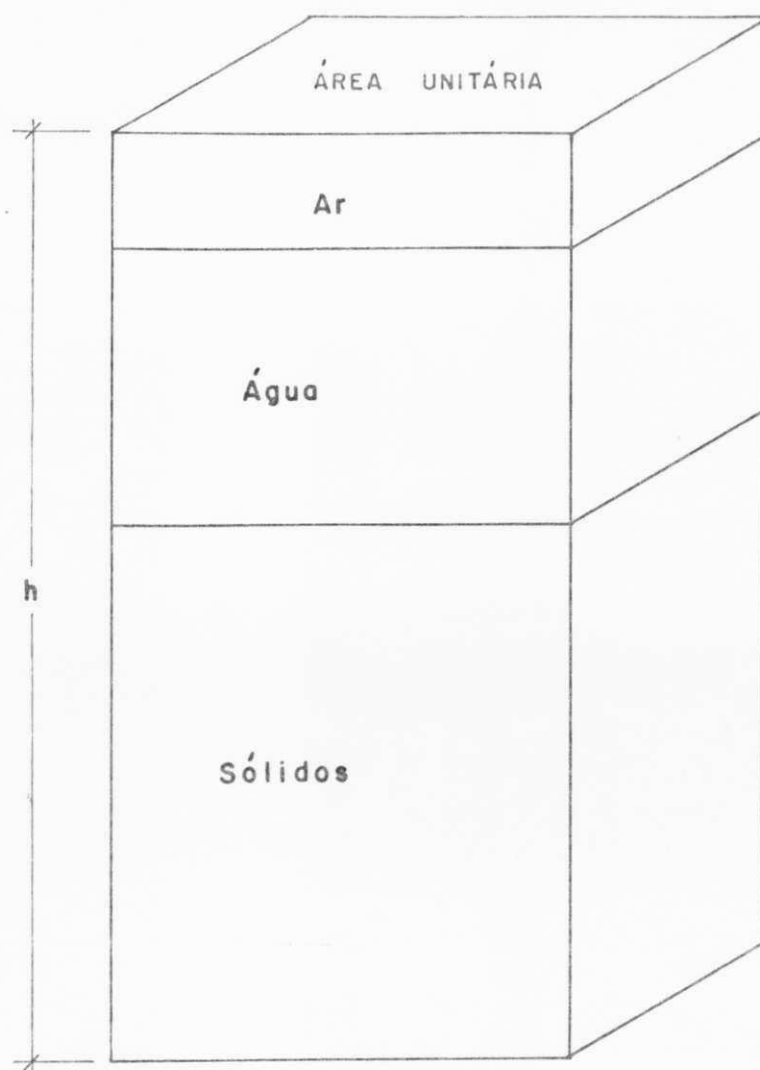


Fig. 3.4 - Diagrama de representação do solo como um sistema de três fases.

comportamento da infiltração da água no solo.

De acordo com Lencastre e Franco (1984), "a infiltração é o movimento da água para dentro do solo, marcado pela ação da gravidade e pelo potencial capilar". A capacidade de infiltração representa a quantidade de água infiltrada na unidade do tempo e depende, basicamente, da porosidade. Como o movimento da água no solo é lento (Lencastre e Franco, 1984), a capacidade de infiltração reduz-se com o tempo. Alguns modelos para a variação da capacidade de infiltração do solo com o tempo podem ser encontrados na literatura. O modelo de Horton é um deles e é bastante usado na Hidrologia.

A equação da curva de capacidade de infiltração de Horton mostrada na Figura 3.3 é dada na forma abaixo:

$$q = q_f + (q_o - q_f) \text{Exp}(-kt) \quad (3.20)$$

onde q representa a capacidade de infiltração do solo, em volume por unidade de área e por unidade de tempo, no instante (t) , q_o e q_f representam as capacidades de infiltração máxima e mínima do solo respectivamente, em volume por unidade de área e por unidade de tempo e k representa um fator de amortecimento dependente do tipo de solo. A lâmina d'água infiltrada é obtida integrando-se a equação de Horton entre os limites $t = 0$ e t .

$$Q = \int_0^t q_f dt = q_f t + (1/k)(q_o - q_f)[1 - \text{Exp}(-kt)] \quad (3.21)$$

O tempo para que a lâmina d'água (Q) seja acumulada no

solo pode ser obtido da equação (3.21) resultando em:

$$t = \left(\frac{1}{q_f} \right) \left[Q - \left(\frac{1}{k} \right) (q_o - q_f) [1 - \text{Exp}(-kt)] \right] \quad (3.22)$$

Para se determinar o tempo de ruptura da parede da ravina a partir da equação (3.22) pode-se utilizar a lâmina d'água dada pela equação (3.19) adaptada ao sistema da Figura 3.1. Para tanto, deve-se definir o valor de "h" na equação (3.19) ou a profundidade do solo que é sujeita à umidade crítica para esse sistema. O critério desenvolvido é apresentado em seguida.

Levando-se em consideração que:

- para condições naturais a umidade se distribui no perfil do solo conforme o gráfico mostrado na Figura 3.5;
- o plano de ruptura adotado tem profundidades variáveis;
- a umidade crítica (U_c) é média e portanto aplica-se à todo o plano de ruptura;
- as duas extremidades do plano de ruptura saturam mais rapidamente que a zona central do plano;

foi adotado o critério de que a lâmina d'água (Q) seja calculada para a metade da profundidade máxima do plano de ruptura, medida a partir da superfície do solo até o plano.

Para ângulos da parede da ravina menores que 90 graus, a profundidade máxima da superfície do solo até o plano pode ser obtida com a equação:

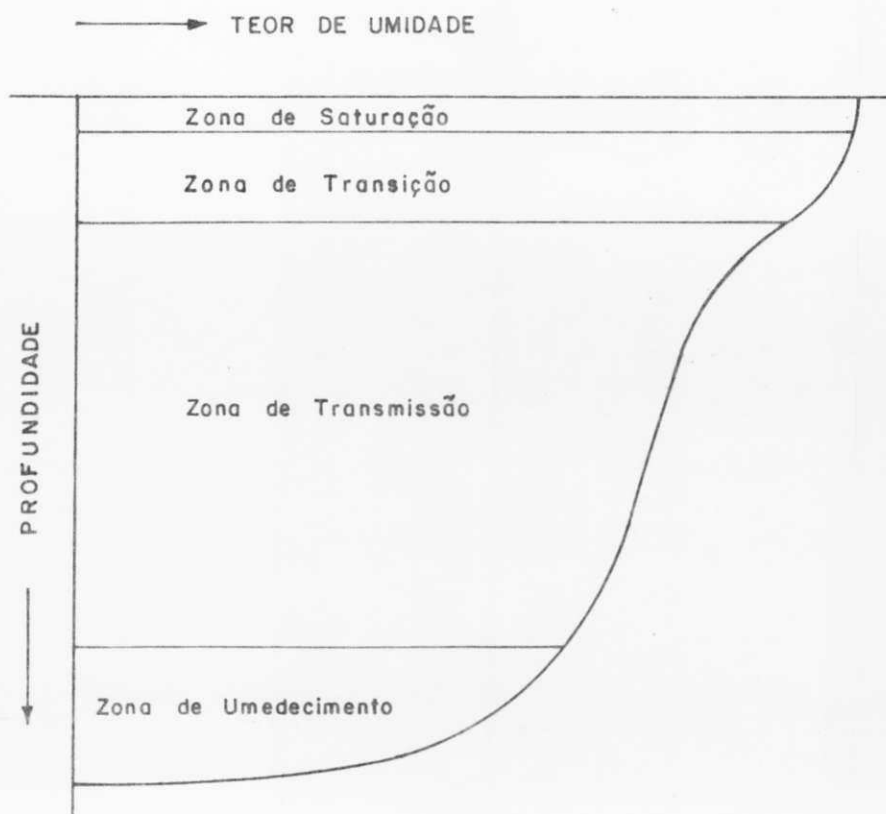


Fig. 3.5 - Distribuição da umidade no perfil do solo a partir da água infiltrada.

[Fonte: Lencastre, A e Franco, F.M. - Lições de Hidrologia, Universidade Nova de Lisboa, 1984]

$$h_m = H \left[1 - \frac{\tan(\theta_c)}{\tan(\alpha)} \right] \quad (3.23)$$

Se o ângulo da parede for 90 graus, a profundidade máxima coincide com a altura da parede.

Assim, pode-se determinar o tempo de ruptura da parede da ravina substituindo-se a equação (3.19), com $h = (1/2) h_m$, na equação (3.22), resultando em:

$$t = \left(\frac{1}{q_f} \right) \left\{ G h_m \left[\frac{C - A U_o - D}{D + A} \right] / 2(1 + \epsilon) - \left(\frac{1}{k} \right) (q_o - q_f) [1 - \text{Exp}(-kt)] \right\} \quad (3.24)$$

Deve-se enfatizar, entretanto, que na prática o critério adotado deve ser tal que os resultados obtidos com a equação sejam os mais próximos da realidade. Em termos de estimativa, o critério deve ser aquele com menor tempo de ruptura.

3.3 - Influência da Presença de Fendas de Tração

A presença de fendas de tração no solo, devidas ao alívio de pressões laterais e aos ciclos de umedecimento e secamento do solo, contribuem para acelerar o processo de ruptura pela facilidade de condução de água para o interior do solo através dessas fendas, como também estruturalmente por definir uma parte onde já está iniciada a ruptura. Naturalmente, a influência da presença de fendas de tração é a de acelerar o processo da falha, pela maior diminuição da área do plano de ruptura em relação ao peso total.

De um modo geral, as fendas de tração ocorrem com mais

frequência na superfície do solo. No entanto, a sua ocorrência na parede lateral (na parte do declive) é também possível. A análise de estabilidade que será desenvolvida adiante leva em conta a influência da fenda de tração na superfície do solo. As fendas localizadas na parede serão tratadas posteriormente, conjuntamente com a influência do lençol freático.

Dois sistemas serão considerados separadamente: um tratando de paredes com inclinação inferior a 90 graus e outro com parede vertical. Os sistemas considerados são mostrados nas Figuras 3.6.a e 3.6.b, onde h representa a profundidade da fenda e B representa o alargamento parcial até a localização da fenda de tração. L representa o comprimento do plano de ruptura entre o pé da parede da ravina e a localização vertical da fenda.

Parede com inclinação $\alpha < 90$ graus - Condições Críticas

As condições críticas no momento da ruptura podem ser obtidas localizando-se a fenda de tração a partir da máxima tensão ativa presente. Esta localização pode ser obtida a partir do número de estabilidade, tal como no caso da identificação do plano crítico feita no ítem 3.2.3. O número de estabilidade máximo é obtido, neste caso, com respeito à profundidade da fenda.

O peso da massa de solo do sistema da Figura 3.6.a pode ser calculado por:

$$W = (1/2)\gamma \left\{ \left[H^2 - h_f^2 \right] \cot(\theta) - h_f^2 \cot(\alpha) \right\} \quad (3.25)$$

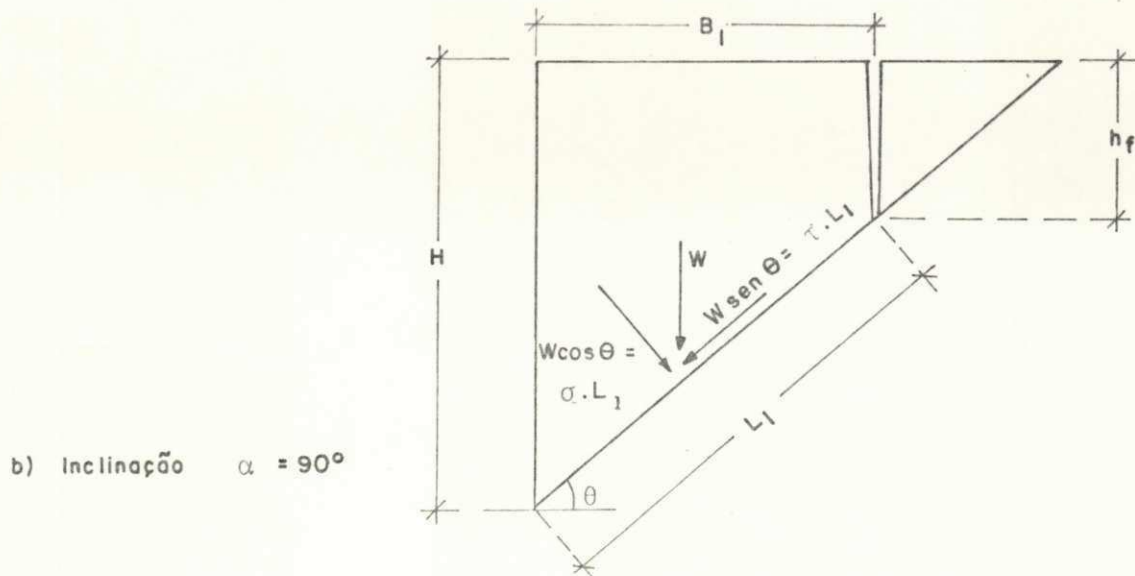
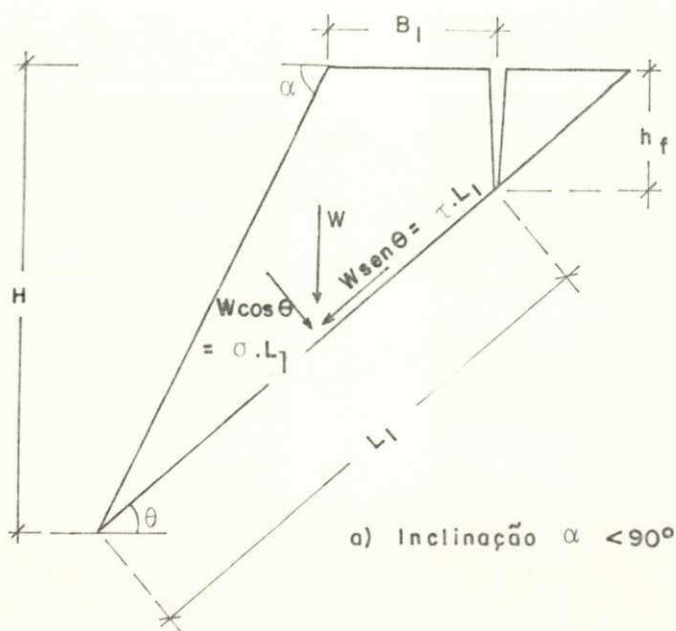


Fig. 3.6 – Sistema representativo da parede da ravina com fenda de tração na superfície.

A coesão requerida para a estabilidade pode ser obtida substituindo-se as tensões normal $[\sigma = W \cos(\theta)/L]$ e de cisalhamento $[\tau = W \sin(\theta)/L]$ na equação (3.1), resultando em:

$$C = \frac{(1/2)\gamma \sin(\theta) \sin(\theta - \phi) H^2 \{ [1 - (h_f/H)] \cot(\theta) - \cot(\alpha) \}}{[\cos(\phi)(H - h_f)]} \quad (3.26)$$

Adimensionalizando-se a equação (3.26) obtém-se:

$$\frac{C}{\gamma H} = \frac{(1/2)\sin(\theta) \sin(\theta - \phi) H \{ [1 - (h_f/H)] \cot(\theta) - \cot(\alpha) \}}{[\cos(\phi)(H - h_f)]} \quad (3.27)$$

Derivando-se a equação (3.27) com relação a h_f e igualando o resultado a zero, define-se a profundidade crítica da fenda como:

$$h_{fc} = H \left[1 - \sqrt{\frac{\tan(\theta)}{\tan(\alpha)}} \right] \quad (3.28)$$

Então, baseado na geometria do sistema, a localização da fenda pode ser obtida da seguinte expressão:

$$B_1 = \left\{ \left[\frac{H - h_{fc}}{\tan(\theta)} \right] - \frac{H}{\tan(\alpha)} \right\} \quad (3.29)$$

As equações (3.28) e (3.29) permitem calcular a profundidade crítica e a localização da fenda de tração para qualquer plano de ruptura (θ). Desde que o plano de ruptura depende da umidade do solo no momento da ruptura, pode-se

avaliar a umidade crítica estimando-se o plano de ruptura a partir da equação (3.8). Combinando-se as equações (3.26) e (3.12), obtém-se:

$$U_c = (C_o + A U_o - E)/(E+A) \quad (3.30)$$

onde

$$E = (1/2)\gamma_s \text{Sen}(\theta_c) \text{Sen}(\theta_c - \phi_c) H \left[\left(1 - \left(\frac{h_{fc}}{H} \right)^2 \right) \text{Cot}(\theta_c) - \text{Cot}(\alpha) \right] / [\text{Cos}(\phi_c)(H - h_{fc})] \quad (3.31)$$

Parede Vertical ($\alpha = 90$ graus) - Condições Críticas

Análogamente à situação anterior, as condições críticas no momento da ruptura podem ser estabelecidas a partir da máxima tensão ativa. No entanto, é fácil verificar que nos casos onde a parede é vertical, a tensão máxima ocorre na extremidade inferior do plano de ruptura. Tal verificação, implica em que a profundidade da fenda corresponda à altura da parede, ou seja $h_{fc} = H$. Esta condição, contudo, é fisicamente imprópria. A análise de estabilidade pode, entretanto, ser desenvolvida permitindo que sejam localizados diferentes pontos onde a fenda pode ocorrer, a partir das quais as condições críticas podem ser estabelecidas.

Para o sistema da Figura 3.6.b o peso da massa de solo pode ser calculado pela relação:

$$W = (1/2)\gamma_t [H^2 - h_f^2] \text{Cot}(\theta) \quad (3.32)$$

Utilizando o mesmo procedimento do caso anterior, chega-se às seguintes expressões para a coesão requerida e para a umidade crítica:

$$C_c = (1/2) \gamma_c \cos(\theta_c) \sin(\theta_c - \phi_c) [H + h_f] / \cos(\phi_c) \quad (3.33)$$

$$U_c = (C_c + A U_o - I) / (1 + A) \quad (3.34)$$

$$\text{onde } I = (1/2) \gamma_s \cos(\theta_c) \sin(\theta_c - \phi_c) [H + h_f] / \cos(\phi_c) \quad (3.35)$$

Uma vez que a umidade crítica é conhecida, em qualquer situação da declividade da parede da ravina, pode-se determinar o tempo de ruptura utilizando-se a mesma metodologia do ítem 3.2.6.

3.4 - Influência do Lençol Freático no Alargamento Lateral

A literatura tem indicado (Ireland et al, 1939; Bradford et al, 1978) que a presença do lençol freático nas proximidades do pé das paredes das ravinas tem contribuído para acelerar o processo de ruptura das paredes laterais devido à perda de resistência na base da parede, pela saturação e conseqüente incremento no peso do solo.

As equações desenvolvidas adiante levam em consideração a influência de uma zona saturada, medida a partir do pé da parede da ravina, e através da análise da estabilidade define-se a zona saturada necessária para a ruptura. A Figura 3.7 mostra o sistema adotado para o desenvolvimento dessas

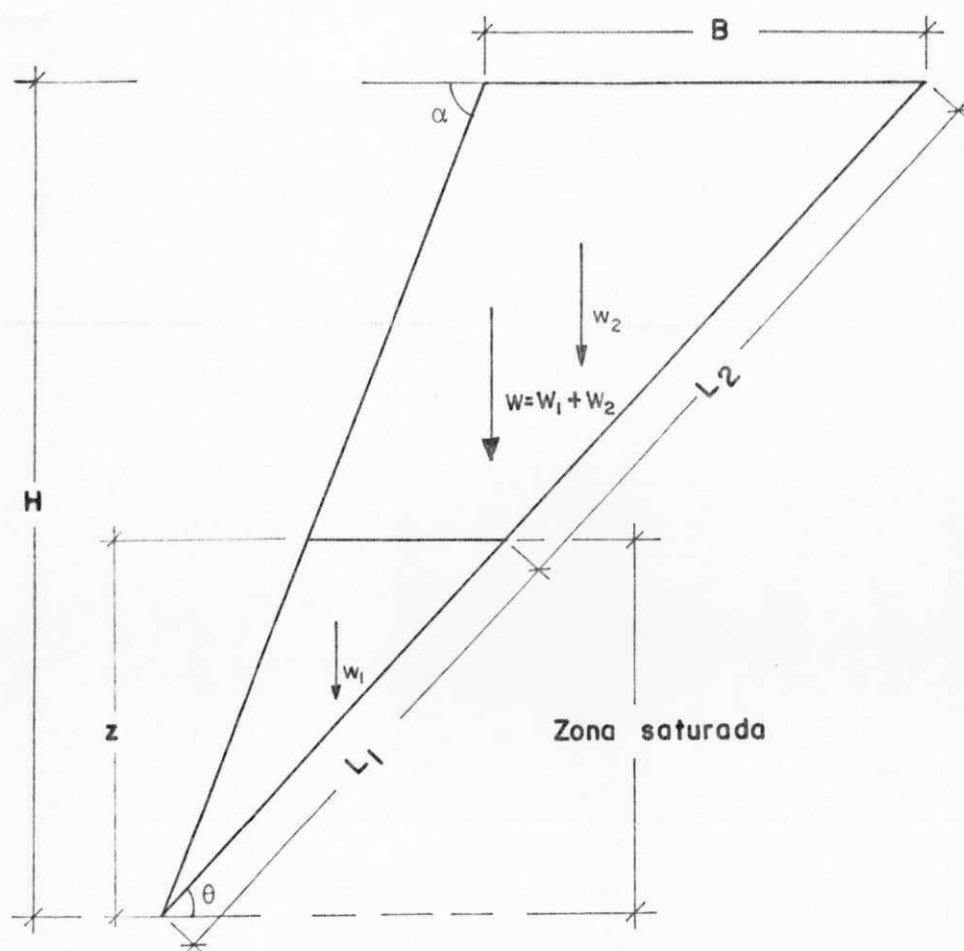


Fig. 3.7 - Sistema representativo da parede da ravina com a zona saturada devido a influência do lençol freático.

equações, onde z representa a zona saturada. W_1 e W_2 representam os pesos dos volumes de solo saturado e natural respectivamente. L_1 e L_2 são os comprimentos do plano saturado e natural respectivamente.

O peso total ($W = W_1 + W_2$) pode ser calculado da expressão:

$$W = \gamma_2 V_2 + \gamma_t (V_1 - V_2) \quad (3.36)$$

onde γ_2 é o peso específico do solo saturado podendo ser obtido da equação (3.5) fazendo $U = U_s$. V_1 e V_2 são os volumes saturado e total, dados por:

$$V_2 = (1/2) z^2 \text{Sen}(\alpha - \theta) / [\text{Sen}(\alpha) \text{Sen}(\theta)] \quad (3.37)$$

$$V_1 = (1/2) H^2 \text{Sen}(\alpha - \theta) / [\text{Sen}(\alpha) \text{Sen}(\theta)] \quad (3.38)$$

Desde que a coesão do solo possui dois valores distintos (C_s no plano L_1 e $C(u)$ no plano L_2), a coesão necessária para que não ocorra a ruptura é obtida ponderando-se estes valores de tal modo que:

$$[C_s L_1 + C(u) L_2] / L = C \quad (3.39)$$

A coesão C pode ser obtida da análise do sistema, substituindo-se as tensões normal e de cisalhamento, devidas ao peso total, na equação (3.1), no que resulta:

$$C = D \left\{ \frac{z^2}{H} (U_s - U) + (1 + U)H \right\} \quad (3.40)$$

onde D é dado pela equação (3.15).

Combinando-se as equações (3.39), com $L_1/L = z/H$ e $L_2/L = (H - z)/H$, e (3.40), chega-se à expressão:

$$z^2 D (U_s - U) + z [C(u) - C_s] + [D(1+U)H^2 - C(u)H] = 0 \quad (3.41)$$

A zona saturada (z) necessária para provocar a ruptura, pode ser determinada a partir da equação (3.41), determinando-se as raízes da mesma. Como o coeficiente do segundo termo é positivo, apenas a raiz positiva satisfaz às condições físicas reais. Assim, a zona saturada pode ser determinada pela expressão:

$$z = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.42)$$

onde $a = D(U_s - U)$; $b = [C(u) - C_s]$ e $c = [D(1+U)H^2 - C(u)H]$.

No estabelecimento da altura da zona saturada ou seja a altura da franja capilar, é necessário considerar alguns aspectos específicos. Quando a umidade inicial é a umidade saturada ($U = U_s$), $C(u) = C(U_s) = C_s$; neste caso os coeficientes "a" e "b" da equação (3.41) são nulos, de modo que a equação torna-se independente de "z". Desse modo restaria, na equação (3.41), apenas o termo independente, cuja solução corresponderia a da equação (3.16) que estabelece a altura mínima (H_{mi}). Assim, para qualquer altura maior do que H_{mi} , na condição da umidade saturada, a ruptura independe de

quaisquer outros aspectos da ravina. Uma outra situação que deve ser considerada é a de z ser menor do que zero. Como o termo independente de z na equação 3.41 cresce com a altura da parede da ravina, pode ocorrer que o determinante seja negativo. Assim, fazendo-se $z = 0$ na equação (3.41) pode-se determinar a altura que provocará a ruptura sem necessidade de existir uma zona saturada. A condição anteriormente tratada na secção 3.2 é um caso particular desta última. A terceira e última consideração decorre da determinação do plano de ruptura. Como existem duas zonas sob condições iniciais de umidade diferentes, necessário se faz que se estabeleça um critério para a determinação do plano de ruptura que depende do valor do ângulo de atrito interno. Caso se recorresse a uma ponderação, seria necessário se a conhecer altura da zona saturada. Como a determinação da altura da zona saturada é o objetivo da análise, recai-se numa tomada de decisão, ou seja: ou se admite o plano para as condições de saturação ($\theta_c = \theta_s$) ou se estima o plano em função da umidade inicial (U). Obviamente para zonas saturadas muito elevadas (próximas de H) a primeira opção seria mais apropriada; no entanto, quando a zona se aproxima do zero, a segunda opção torna-se mais apropriada. Para finalidades de comparação, pode-se estabelecer qualquer uma das duas opções sem maiores consequências.

3.4.1 - Os Limites Físicos da Zona Saturada

A altura da zona saturada, definida pela equação (3.42), determina as condições limites da estabilidade da parede da

ravina. Entretanto, z depende das condições físicas do solo tais como porosidade, tensão superficial, permeabilidade e da própria localização do lençol freático que, por sua vez, depende das condições hidrometeorológicas locais. Geralmente os sistemas perenes de drenagem apresentam níveis freáticos bem elevados mesmo durante o período de estiagem. Já os sistemas intermitentes ou efêmeros apresentam níveis d'água subterrânea ocorrendo nas proximidades do leito do canal podendo ter níveis abaixo deste. As ravinas podem se desenvolver nos sistemas de drenagem sob qualquer regime, e conseqüentemente, poderá se ter, dependendo da severidade da erosão, o lençol freático acima do leito da ravina, no leito, ou abaixo do mesmo. O método de cálculo desenvolvido acima não distingue a localização do lençol, mas a zona, inclusive a franja capilar. Contudo, deve-se observar que na maioria dos casos, a sua localização nas proximidades do leito da ravina parece ser a mais frequente (Ireland et al, 1939). Sendo assim, a zona saturada se desenvolveria mais predominantemente pela capilaridade.

Limites práticos para a capilaridade foram apresentados por Taylor (1963) em função da permeabilidade saturada (K) do solo. Estes limites são apresentados abaixo:

$$0.7 / \sqrt{K} < z < 2.4 / \sqrt{K} \quad (3.43)$$

sendo z em centímetros e K em centímetros por segundo. Caso o lençol freático se localize no pé da parede da ravina, o limite superior da equação (3.43) deve ser comparado com o

valor estabelecido pela equação (3.42), para se verificar a possibilidade da ruptura pelo efeito exclusivo do lençol freático.

3.5 - Influência conjunta do Lençol e de Fendas de Tração no Alargamento Lateral

A existência das fendas pode provocar a ruptura mais cedo se combinada com o efeito do lençol freático. Duas situações serão consideradas nesta análise: uma com a fenda ocorrendo na superfície do solo e a outra com a fenda ocorrendo na parede da ravina. No segundo caso, a zona saturada se estende até o fundo da fenda, o que parece ser bem razoável. Os sistemas são mostrados nas Figuras 3.8 e 3.9.

3.5.1 - Influência do Lençol com a Fenda na Superfície

A análise que será desenvolvida nesta seção é geral e pode ser aplicada em qualquer situação de inclinação da parede da ravina (Figura 3.8.a). A partir do resultado obtido para a quantificação, da altura da zona saturada, uma situação particular será desenvolvida também, quando a parede é vertical e a fenda atinge a zona saturada (Figura 3.8.b).

Para a situação geral, partindo do mesmo raciocínio apresentado no ítem 3.4, chega-se à uma expressão da mesma natureza que a equação (3.41), cujo desenvolvimento não se faz necessário apresentar, haja visto que a metodologia é a mesma. O resultado da análise para este caso é dado a seguir.

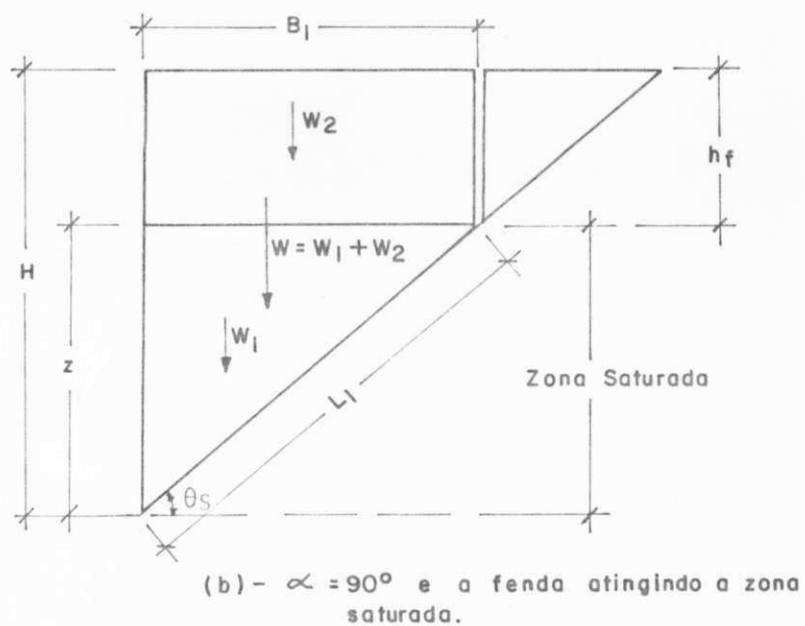
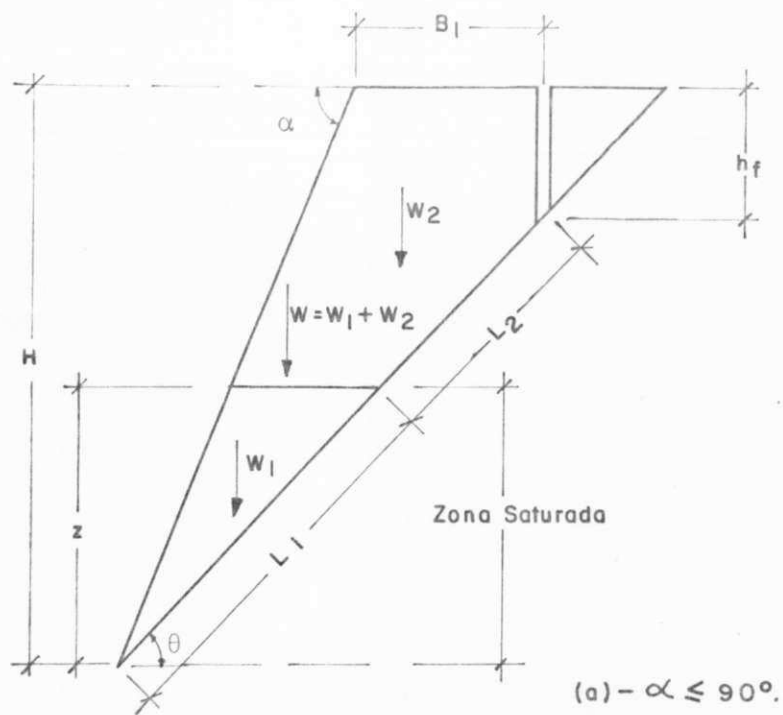


Fig. 3.8. (a) e (b) - Sistema representativo da parede da ravina com fenda de tração na superfície e a zona saturada devido a influência do lençol freático.

$$z \frac{D(U_s - U)}{2s} + z \frac{[C(u) - C_s]}{s} + \frac{[D(1+U)H - C(u)(H-h_f)]}{f} - h_f \frac{D(1+U) \cos(\theta) \sin(\alpha) / \sin(\alpha - \theta)}{f} = 0 \quad (3.44)$$

onde D é dado pela equação (3.15).

A equação (3.44) difere da equação (3.41) apenas no termo independente de z . É fácil notar que quando $h_f = 0$ a equação (3.44) transforma-se na equação (3.41). Assim, toda a discussão apresentada anteriormente no ítem 3.4 é também válida para a situação aqui considerada. Uma consideração que deve ser feita é sobre o valor de h_f . Nos casos em que o ângulo da parede da ravina seja inferior a 90 graus, pode-se utilizar a equação (3.28) para avaliar a profundidade crítica da fenda. Para os casos em que a parede da ravina é vertical, h_f poderá assumir qualquer valor entre 0 e H .

A determinação da zona saturada atingindo a fenda de tração para paredes verticais pode ser facilmente obtida da equação (3.44). Com a consideração de que a zona saturada atinge a parte mais inferior da fenda de tração, pode-se fazer $h_f = H - z$ na equação (3.44) resultando, na expressão mostrada abaixo:

$$z = \frac{[2 H (1+U) - C_s / D]}{[2 (1+U) - (1+U) / s]} \quad (3.45)$$

Fisicamente, a aplicação da equação (3.45) está limitada à condição:

$$0 \leq z \leq H \quad (3.46)$$

No limite inferior, quando $z = 0$, a altura da parede pode ser obtida resolvendo a equação (3.45), ou seja:

$$H = \frac{C}{2 D (1+U)} \quad (3.47)$$

No limite superior, quando $z = H$ e $h_f = 0$, ou seja sem fenda de tração, a umidade corresponde ao valor da umidade na saturação ($U = U_s$). Neste caso, a solução da equação (3.45), resulta exatamente na equação (3.16) que estabelece a altura mínima (H_{mi}) para a ocorrência da ruptura das paredes. Deste modo, com base na condição dada na equação (3.46) a altura da ravina está limitada pela relação:

$$\frac{C}{2 D (1+U)} \leq H \leq H_{mi} \quad (3.48)$$

É interessante notar que na equação (3.48) se a umidade for a da saturação ($U = U_s$), a altura mínima sujeita à ruptura com a fenda de tração cai para a metade, visto que o limite inferior da equação (3.48) torna-se $(1/2)(H_{mi})$.

É evidente que os limites físicos para a altura da zona saturada discutidos na secção 3.4.1 devem ser verificados para que os valores da altura da zona saturada fornecidos pelas equações (3.44) e (3.45) sejam realizáveis.

3.5.2 - Influência do Lençol com a Fenda na Parede

O aspecto mais importante nesta situação é o de verificar a possibilidade da ruptura ocorrer parcialmente,

devido à saturação de uma zona medida a partir do pé da parede da ravina, cujo limite superior coincide com o limite inferior da fenda de tração.

Conforme a Figura 3.9, o peso da massa de solo em consideração, é a soma dos pesos W_1 e W_2 , no plano saturado L_1 . Como o sistema parcial considerado está totalmente situado sobre a parte do plano saturado, a inclinação deste é definida pelo ângulo de atrito na condição saturada e pela inclinação da parede, ou seja, $\theta_s = (\alpha + \phi_s)/2$. As equações derivadas a seguir são válidas apenas para inclinações inferiores a 90 graus. As equações para paredes verticais já foram derivadas na secção anterior (Equações 3.45 a 3.48), que correspondem à análise feita a partir da Figura 3.8.b.

O peso total do sistema parcial da Figura 3.9 é dado por:

$$W = (1/2) z L_1 \text{Sen}(\alpha - \phi_s) \gamma_s \{ (1+U_s) + (1+U_s) * [\text{Cot}(\theta_s) \text{Tan}(\alpha) - 1] \} / \text{Sen}(\alpha) \quad (3.49)$$

Calculando-se as tensões normal e de cisalhamento, devidas ao peso (W), e substituindo-se na equação (3.1), resulta na seguinte expressão para a altura da zona saturada:

$$z = 2 C_s \text{Sen}(\alpha) \text{Cos}(\phi_s) / \{ \text{Sen}(\alpha - \phi_s) \text{Sen}(\theta_s - \phi_s) \gamma_s \{ (1+U_s) + (1+U_s) [\text{Cot}(\theta_s) \text{Tan}(\alpha) - 1] \} \} \quad (3.50)$$

Com z obtido pela equação (3.50), pode-se calcular a profundidade da fenda e a sua localização com relação ao pé da

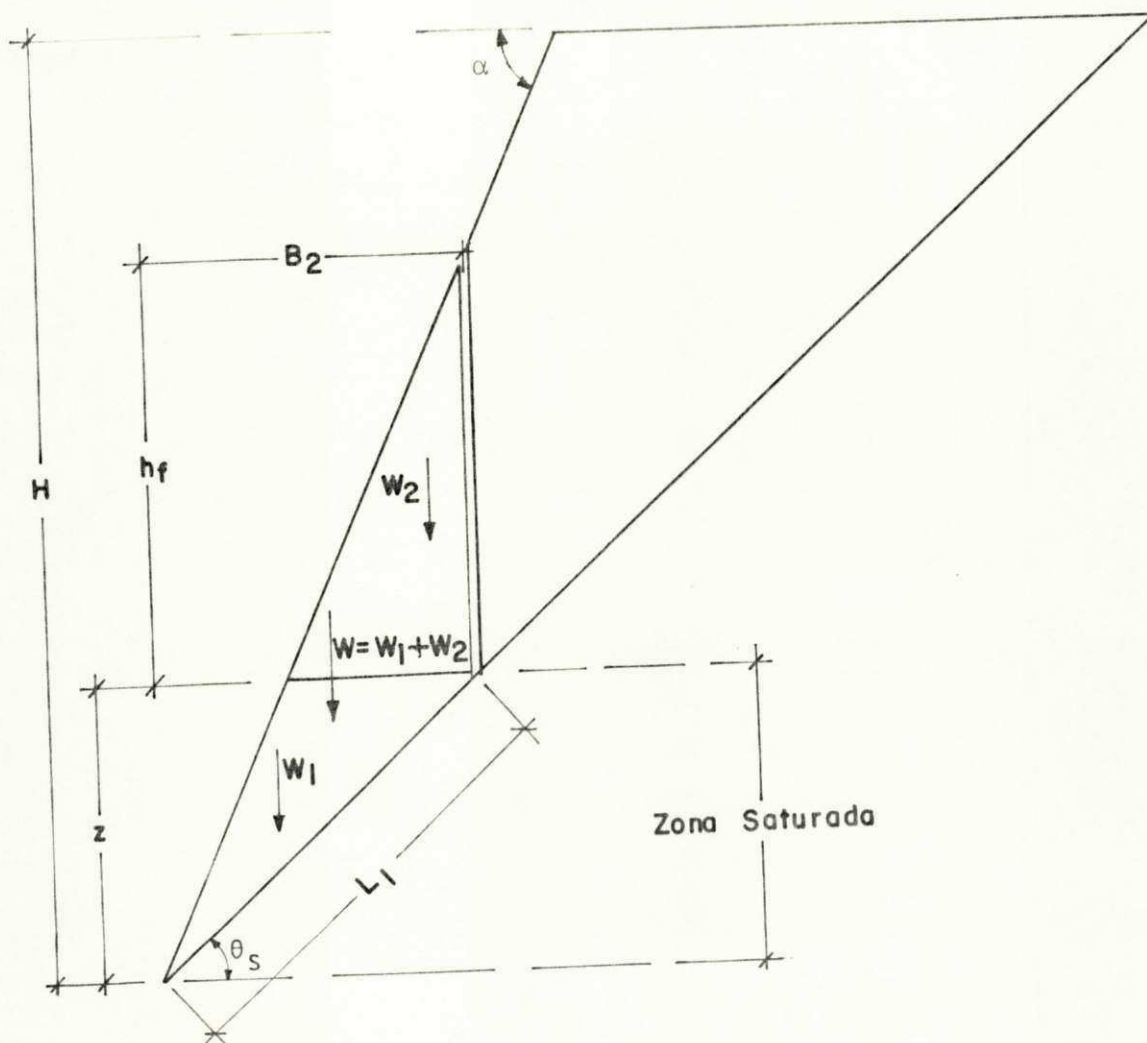


Fig. 3.9 - Sistema representativo com fenda localizada na parede atingindo a zona saturada.

parede com as equações:

$$h_f = z \left[\frac{\cot(\theta)}{s} \tan(\alpha) - 1 \right] \quad (3.51)$$

$$B_z = z / \tan(\theta) \quad (3.52)$$

As equações (3.50) e (3.51) definem a altura da zona saturada e a profundidade da fenda de tração, necessárias para provocar a ruptura parcial da parede da ravina.

3.6 - Comentários Sobre o Tratamento Analítico

As equações desenvolvidas nas secções anteriores fornecem um meio de se avaliar as condições críticas do alargamento lateral de ravinas. Deve-se lembrar que para a aplicação destas equações, na forma em que se apresentam, as condições físicas do solo devem corresponder àquelas adotadas no desenvolvimento analítico. Contudo, na prática, estas condições geralmente variam de um solo para outro e portanto devem ser avaliadas para cada solo e adequadas à metodologia proposta neste trabalho. Um outro aspecto importante é com respeito às condições hidrometeorológicas. Como se admitiu, para fins da determinação do tempo de ruptura, a curva de Horton da capacidade de infiltração pode ocorrer, também, que esta variação não se verifique numa dada situação. Esta variação deve ser estabelecida para cada local. Obviamente, para uma verificação dos resultados fornecidos com as equações nas condições práticas deve-se dispor dessas informações, o

que é muito raro. Uma análise comparativa, porém, será feita através das aplicações demonstrativas, no capítulo a seguir.

4 - APLICAÇÕES DEMONSTRATIVAS DAS EQUAÇÕES

4.1 - Generalidades

As equações estabelecidas no capítulo anterior, para as diversas situações, expressam as condições críticas para o início do processo de alargamento lateral por ruptura.

A aplicação dessas equações aos casos reais de campo depende basicamente da disponibilidade de informações detalhadas das condições geométricas das ravinas, de medições precisas das condições físicas do solo e das condições hidrometeorológicas locais. Além do mais, são necessários registros sobre o tempo de ruptura das paredes da ravina e da quantidade de solo erodida das mesmas, para fins de comparação com os resultados obtidos com a aplicação das equações. Dados de campo que incluem estas informações não foram encontrados na literatura. Caso essas informações fossem disponíveis, os resultados obtidos com as equações poderiam ser comparados com aqueles registrados e, conseqüentemente, poder-se-ia estabelecer o grau de precisão das equações. Não foram encontradas na bibliografia todas as informações para tal fim e portanto decidiu-se verificar a consistência dos resultados através das aplicações demonstrativas. Para isso, algumas considerações devem ser feitas a partir das quais se pode gerar resultados que poderão ser discutidos posteriormente.

4.2 - Situações Geométricas

Segundo Peterson (1950) e Leopold et al (1964), as ravinas seguem um padrão de desenvolvimento característico em todas as localidades. São sempre marcadas por paredes muito íngremes formando secções transversais típicas em forma de U ou V, um canal à jusante da cabeceira com profundidades bastante variáveis e um canal de contribuição à montante.

As secções transversais em forma de "U" ocorrem em geral, em solos maleáveis e de erodibilidade relativamente alta. Nos solos mais resistentes predomina a forma em "V". As ravinas de grande largura apresentam secções transversais em "U" enquanto as ravinas de pequena largura apresentam secções transversais em "V", independente da natureza do solo.

Em extensão, as ravinas podem apresentar diferentes magnitudes e formas. Brice (1966) descreveu as características das ravinas como muito largas e extensas, de paredes laterais e cabeceira íngremes e incisivas em materiais não consolidados. As ravinas podem se apresentar estreitas ou amplas, com bordas convergentes, em forma de lança, ou arredondadas em semi-círculos próximo à cabeceira. As ravinas com bordas convergentes são em geral estreitas e longas e se desenvolvem de uma forma mais ou menos linear com secção transversal em forma de V. As ravinas com bordas arredondadas são largas e apresentam predominantemente secções transversais em U; desenvolvem-se em geral de forma irregular, podendo apresentar ravinas tributárias ao longo de sua extensão ou ter ramificações na cabeceira.

Ireland et al (1939) verificaram características geométricas em 12 ravinas em Spartamburg na Carolina do Sul (EUA). Segundo suas observações a natureza do solo naquela região foi da maior importância no desenvolvimento e geometria das ravinas. De acordo com Bradford et al (1978) a geometria depende principalmente da morfologia do material, do tipo de ruptura da parede e da capacidade do escoamento em transportar o material erodido e acumulado no leito das ravinas, cuja magnitude é altamente variável.

As equações desenvolvidas no capítulo anterior são gerais e podem ser aplicadas em qualquer situação geométrica possível, desde que a ravina seja dividida em trechos com condições geométricas uniformes. Em relação à inclinação da parede, dois exemplos serão apresentados: um com inclinação menor do que 90 graus (em forma de V) e outro com parede vertical, ou seja com o ângulo de 90 graus (em forma de U). Com relação a altura da parede, esta está sempre limitada à espessura do manto de solo. Bacias com solos de profundidades inferiores às alturas mínimas necessárias para o processo de ruptura, não alargam segundo o processo aqui considerado. Nestes casos a erosão é devida à ação do escoamento superficial e outros efeitos. Indicações encontradas na literatura mostram registros de alturas de ravinas que variam de 6 pés a 60 pés (1,8 metros a 18 metros aproximadamente). Nas aplicações são consideradas alturas entre a altura mínima, estabelecida pela equação (3.16), e até 20 metros, cobrindo uma faixa bastante ampla.

4.3 - Condições Físicas do Solo

As considerações sobre os dados físicos do solo são referentes ao "loess". Para este tipo de solo, Berezantzev et al (1969) determinaram experimentalmente a variação da coesão e do ângulo de atrito interno como uma função da umidade, apresentada na Figura 3.2. Para a faixa de maior concentração dos dados, cujo comportamento é linear em ambos os casos, os valores correspondentes citados por eles são:

$$\begin{array}{ll} C_0 = 0,85 \text{ Kgf/cm}^2 & U_0 = 0,10 \text{ g/g} \\ C_s = 0,05 \text{ Kgf/cm}^2 & U_s = 0,38 \text{ g/g} \\ \gamma_s = 1,4 \text{ g/cm}^3 & \end{array}$$

Outros dados tais como, porosidade η , índice de vazios e e densidade dos grãos G , necessários à aplicação, foram derivados a partir das informações acima através de relações dos índices físicos do solo. Para um solo homogêneo, a relação entre o peso específico da água (γ_a) e o peso específico do solo seco (γ_s) pode ser calculada pela equação:

$$\gamma_a / \gamma_s = (1+e)/G \quad (4.1)$$

Multiplicando-se e dividindo-se o segundo membro da equação (4.1) pelo índice de vazios obtém-se:

$$\gamma_a / \gamma_s = [(1+e)/e] * (e/G) = (U/S)/\eta \quad (4.2)$$

onde $(1+\epsilon)/\epsilon$ representa a relação inversa da porosidade e (ϵ/G) representa a relação entre a umidade e o grau de saturação (U/S) . Quando o solo está saturado $S = 1$ e a umidade correspondente é $U = 0,38$. Deste modo, substituindo-se estes valores na equação (4.2) com $\gamma_s = 1$ g/cm³ e $\gamma_a = 1,4$ g/cm³, resulta $\eta = 0,532$. Conseqüentemente, o valor do índice de vazios e da densidade dos grãos são respectivamente 1,137 e 2,99.

Uma verificação feita na literatura (Jumikis, 1967) sobre o "loess" indicou uma variação pequena desses parâmetros calculados com aqueles médios, para esse tipo de solo, o que torna os valores calculados bem aceitáveis.

Os outros dados do solo necessários à aplicação, foram adotados de acordo com os valores típicos médios encontrados na bibliografia (Lencastre e Franco, 1984). Estes dados são:

Capacidade de infiltração máxima (q_0)	= 60 mm/hora
Capacidade de infiltração mínima (q_f)	= 6 mm/hora
Fator de amortecimento (k)	= 0,5/hora

4.4 - Condições Hidrometeorológicas

4.4.1 - A Intensidade das Chuvas

Os modelos desenvolvidos levaram em consideração que o regime de precipitações, representado evento a evento pelo hietograma da chuva, tem a intensidade da precipitação, em qualquer instante, no mínimo o valor da capacidade de

infiltração do solo, o que garante que o volume d'água infiltrado, por unidade de área, seja obtido pela integração da função da curva. Tal consideração, no entanto, pode não se verificar na prática, visto que uma chuva natural inclui, normalmente, as fases de menor intensidade, correspondentes ao início e fim da precipitação respectivamente, podendo ter intensidade inferior à capacidade de infiltração do solo, acarretando em condições críticas atingidas mais tarde. A Figura 4.1 mostra uma superposição do hietograma de uma chuva hipotética sobre a curva de capacidade de infiltração também hipotética. A área II representa o volume infiltrado por unidade de área durante a chuva, cuja magnitude é inferior ao da área compreendida entre a curva e a abcissa que corresponde a hipótese admitida para a determinação do tempo de ruptura. A área I representa o volume escoado ou a parcela da precipitação que se transforma em escoamento. Naturalmente, o escoamento pode exercer uma influência significativa no processo de ruptura dependendo da sua magnitude, no entanto essa influência é difícil de ser considerada e não foi cogitada neste trabalho.

4.4.2 - A Duração das Chuvas e as Condições Antecedentes

A duração para a ruptura, apresentada no tratamento analítico do capítulo anterior, corresponde à duração da chuva capaz de provocar o processo do alargamento lateral por ruptura. A metodologia proposta para a obtenção das condições críticas do alargamento lateral, supõe que haja uma chuva

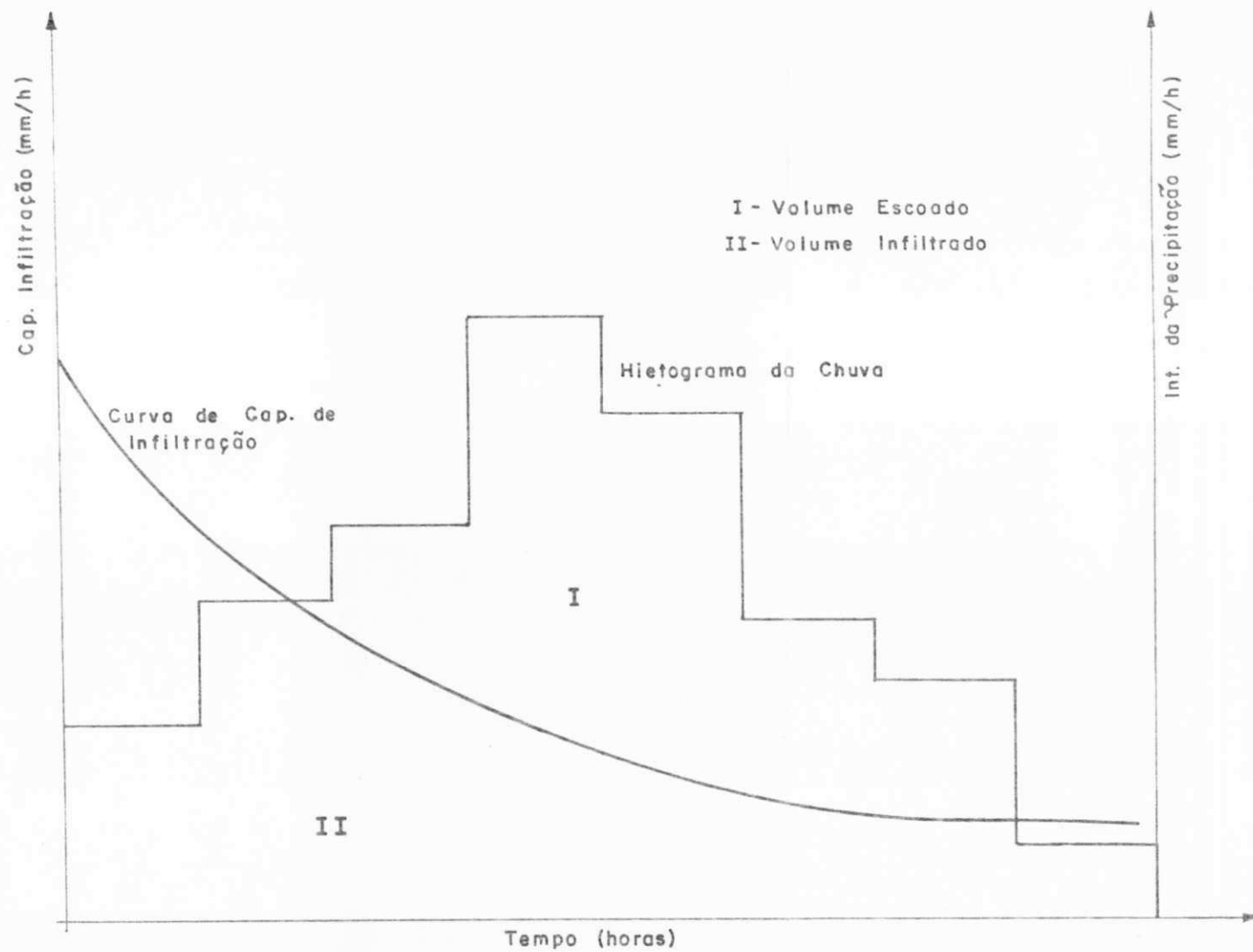


Fig. 4.1- Curvas hipotéticas da capacidade de infiltração do solo e do hietograma da chuva.

contínua com duração no mínimo igual a do tempo de ruptura da parede da ravina. As chuvas de grande intensidade têm, em geral, menor duração que as chuvas de baixa intensidade. Assim, apenas aquelas chuvas que tenham uma intensidade sempre superior a capacidade de infiltração e a duração suficiente causariam o alargamento lateral. As chuvas de baixa intensidade, mesmo as de longa duração, podem ainda não ter a infiltração total suficiente para provocar a ruptura numa dada condição geométrica da ravina. Em ambos os casos, porém, para uma chuva posterior, as condições iniciais do solo não serão mais as mesmas do que no caso anterior. Desde que a diminuição da umidade do solo, entre dois eventos de chuva, não seja suficiente para voltar para as mesmas condições anteriores, as condições críticas da ruptura serão atingidas mais cedo, ou durante uma chuva bem menor do que a anterior.

4.5 - Outras Considerações

Na derivação das equações não foi levada em consideração a influência de alguns fatores, tais como cobertura vegetal da superfície do solo e a declividade natural do terreno. Estes fatores são muito relevantes nos processos de infiltração e do escoamento superficial. Da mesma maneira a influência das forças do escoamento subsuperficial também não foram consideradas; no entanto, segundo observações de Bradford et al (1978) as forças do escoamento subterrâneo parecem exercer uma menor influência no processo do alargamento do que a perda de resistência pelo aumento da

umidade do solo. Estes aspectos, contudo, não podem ser incluídos nos estudos analíticos e necessitam de estudos de campo para se avaliar a magnitude da influência desses fatores nas diferentes condições em que as ravinas se desenvolvam.

4.6 - Procedimento Para Aplicação

A influência de três fatores foi levada em conta no desenvolvimento analítico: a infiltração da água das chuvas, o lençol freático e presença das fendas de tração. O Quadro 4.1 resume as situações físicas analisadas analiticamente no capítulo anterior.

No primeiro e no segundo caso, isto é, alargamento total por infiltração e alargamento parcial por infiltração e presença de fendas, os resultados procurados, como a umidade crítica (U_c), o ângulo de atrito interno crítico (ϕ_c), o alargamento lateral (B) e o tempo de ruptura (t) são obtidos através do seguinte procedimento: com a altura (H) e o ângulo da parede da ravina (α) conhecidos, calcula-se a umidade crítica com a equação (3.14), no primeiro caso, e com as equações (3.30) ou (3.34), no segundo caso, dependendo do valor do ângulo da parede da ravina. Adotando-se um valor inicial qualquer para o ângulo de atrito interno do solo, a umidade crítica é calculada. Verifica-se se o valor do ângulo de atrito interno adotado corresponde ao valor fornecido pela equação (3.13). Caso não corresponda, repete-se o procedimento com o novo valor do ângulo de atrito interno calculado até que o grau de precisão desejado seja atingido. Quando esta

Quadro 4.1 - Situações Consideradas no Tratamento Analítico do Alargamento Lateral por Ruptura

ALARGAMENTO	CAUSA DO ALARGAMENTO	SISTEMA CONSIDERADO
1. Total	Infiltração	Figura 3.1
2. Parcial	Infilt. + Fenda na Superfície	Figuras 3.6 a e b
3. Total	Infilt. + Lençol Freático	Figura 3.7
4. Parcial	Infilt. + Fenda na Superf. + Lençol	Figuras 3.8 a e b
5. Parcial	Infilt. + Fenda na Parede + Lençol	Figura 3.9

condição é satisfeita, determina-se o alargamento (B) com a equação (3.9) e o tempo de ruptura com a equação (3.24). Particularmente no segundo caso, a profundidade crítica da fenda de tração é obtida pela equação (3.28) e o alargamento (B) com a equação (3.29) se α é menor do que 90 graus. No caso da parede ser vertical ($\alpha = 90$ graus) a profundidade da fenda foi considerada igual à metade da altura da parede da ravina e o alargamento $(B) = (H - h_1) / \tan(\theta)$; o tempo de ruptura foi calculado, neste caso, com a equação (3.24) trocando-se o termo D pelos termos E, dado pela equação (3.31) ou I, dado pela equação (3.39), dependendo do valor da inclinação da parede.

No terceiro e no quarto caso, que tratam do efeito conjunto da infiltração e do lençol freático e da presença de fendas de tração, determina-se a altura da zona saturada necessária para provocar a ruptura. Nas duas situações estima-se a altura da zona saturada (z) pelas equações (3.41) e (3.44) conhecendo-se a altura da parede (H), o ângulo da parede (α) e a umidade (U) do solo, presente. O ângulo de atrito interno do solo (ϕ) é calculado com a equação (3.13) e o plano de ruptura estimado pela equação (3.8). No caso particular da quarta situação, que considera a presença de fendas, estima-se a profundidade da fenda pela equação (3.28) quando o ângulo da parede é menor que 90 graus e quando o ângulo da parede é 90 graus considera-se a profundidade da fenda como sendo a metade da altura da ravina. Ainda, se a parede é vertical e a fenda atinge a zona saturada, determina-se a zona saturada com a equação (3.45) e a localização com a

equação (3.52). A profundidade da fenda, neste caso, é determinada pela diferença entre a altura da ravina (H) e a altura da zona saturada (z). Particularmente nesta situação, o ângulo de atrito corresponde ao valor do ângulo na saturação.

No quinto e último caso, em que se considera a presença de fendas na parede, a altura da zona saturada necessária para provocar a ruptura é obtida com a equação (3.50), e a profundidade da fenda é estabelecida com a equação (3.51). A localização da fenda em relação ao pé da parede é obtida com a equação (3.52). São necessários, para tanto, a umidade (U) e o ângulo da parede (α).

4.7 - Os Resultados Obtidos

No Anexo A, são apresentados os resultados da aplicação, segundo o procedimento e considerações explicados anteriormente. Para tanto, um programa computacional em linguagem BASIC, contendo duas rotinas específicas, uma para o cálculo iterativo do ângulo de atrito interno crítico e outra para o cálculo iterativo do tempo de ruptura, foi desenvolvido especificamente para gerar os resultados. A listagem do programa encontra-se no Anexo B. Os resultados obtidos serão discutidos no capítulo seguinte.

5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O Processo do alargamento lateral de ravinas foi tratado neste trabalho como um processo de ruptura das paredes laterais, tendo sido considerados na análise, a influência da infiltração, das fendas de tração e do lençol freático. Utilizando as condições críticas estabelecidas foram calculadas a umidade crítica, a duração e as alturas das zonas saturadas necessárias para a ruptura. Os resultados obtidos encontram-se tabelados no Anexo A. A significância dos resultados e o comportamento das ravinas em condições diferentes são discutidos neste capítulo.

As Tabelas do Anexo A.1 mostram os resultados obtidos quando se considera apenas a influência da infiltração no processo de ruptura. Observando-se os resultados ali apresentados pode-se verificar que, quanto mais íngreme é a parede o processo do alargamento por ruptura se inicia para uma altura menor. Pode-se notar que para uma inclinação de 75 graus a altura mínima é de 198,2 cm enquanto para 90 graus essa altura cai para 137,4 cm. Nestas condições da altura mínima a umidade corresponde à saturação, e conseqüentemente, para alturas da parede menores que a mínima o alargamento só será possível devido aos outros efeitos tal como a erosão pelo escoamento superficial. Em termos do alargamento (B), causado pela ruptura, pode-se observar que para inclinações mais

Íngremes o alargamento é maior, o que caracteriza uma situação mais crítica do ponto de vista da erosão, haja visto que a erosão bruta aumenta. Por exemplo, adotando-se uma altura (H) de 1000,00 cm e a inclinação de 75 graus, resulta um alargamento de 670,7 cm enquanto para a inclinação de 90 graus o alargamento aumenta para 700,4 cm. Embora o aumento do alargamento seja da ordem de menos de 5%, o aumento da erosão bruta chega em torno de 11%, o que é muito mais significativo em termos da produção de sedimentos. Ainda para este exemplo, a lâmina d'água correspondente à umidade crítica nos dois casos é: 159,3 cm para a umidade crítica de 31,87% e 200,8 cm para a umidade crítica de 28,71% respectivamente. Embora a umidade crítica para o ângulo de 90 graus seja menor a lâmina d'água é maior do que para 75 graus devido ao aumento da profundidade máxima para o plano de ruptura. Como consequência a duração necessária para a ruptura é maior para inclinações maiores (247,6 horas e 316,7 horas no exemplo citado acima). Naturalmente, os resultados para o tempo de ruptura dependem também do critério que se adote para calcular a lâmina d'água correspondente à umidade crítica.

As Tabelas do Anexo A.2 mostram os resultados obtidos quando se considera a influência da infiltração e das fendas de tração ocorrendo na superfície. Como era de se esperar, os resultados comportam-se como no caso analisado acima. No entanto, quando se compara os resultados das duas situações, verifica-se que quando há cocorrência de fendas as, condições do alargamento têm níveis críticos bem menores, como era, também, de se esperar.

Os gráficos das Figuras 5.1 e 5.2 comparam as duas situações (alargamento sem fenda e alargamento com fenda) para as inclinações da parede de 75 e 90 graus. Conforme se pode ver na Figura 5.1, a umidade crítica é sempre menor quando se considera a influência das fendas de tração. Como consequência, para condições saturadas, o processo de ruptura se inicia para uma altura menor do que a altura mínima. O gráfico da Figura 5.2 compara os tempos de ruptura entre as duas situações. Pode-se notar que a influência da presença da fenda de tração é a de acelerar o processo de ruptura, haja visto que apresenta sempre menores tempos de ruptura. Um comportamento interessante é indicado pela curva 2 da Figura 5.2. A partir da altura de 1700,00 cm, o tempo de ruptura começa a diminuir com o aumento da altura da ravina. Esta mudança no comportamento decorre do fato de que a taxa de acréscimo das tensões no plano de ruptura a partir desta altura, devido ao aumento do volume da massa de solo, é maior do que a taxa de diminuição da resistência devida ao aumento da umidade. Como consequência, a lâmina d'água correspondente à umidade crítica, calculada para o ponto cuja profundidade é a metade da profundidade máxima do plano de ruptura, decresce a partir daquela altura. Este comportamento também seria verificado na curva 1 da Figura 5.2, isto é para o caso da ruptura causada exclusivamente pela infiltração, para alturas da ravina superiores a 20 m, as quais não foram analisadas neste trabalho.

Deve-se enfatizar, que os tempos de ruptura apresentados nas tabelas dos Anexos A.1 e A.2 são hipotéticos, pelo fato de

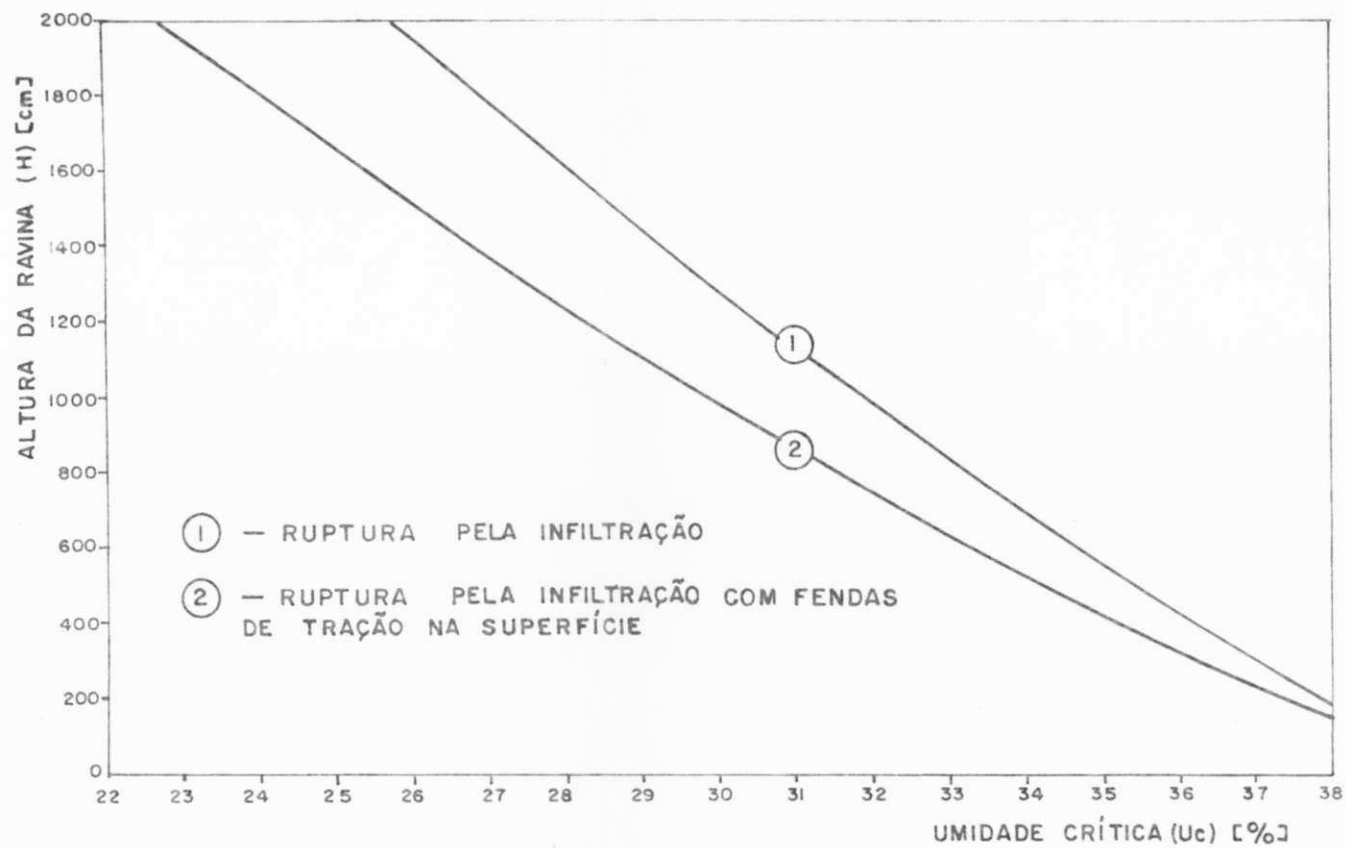


Fig. 5.1— Efeito comparativo da presença de fendas de tração sobre a umidade crítica de rompimento para $\alpha = 75^\circ$.

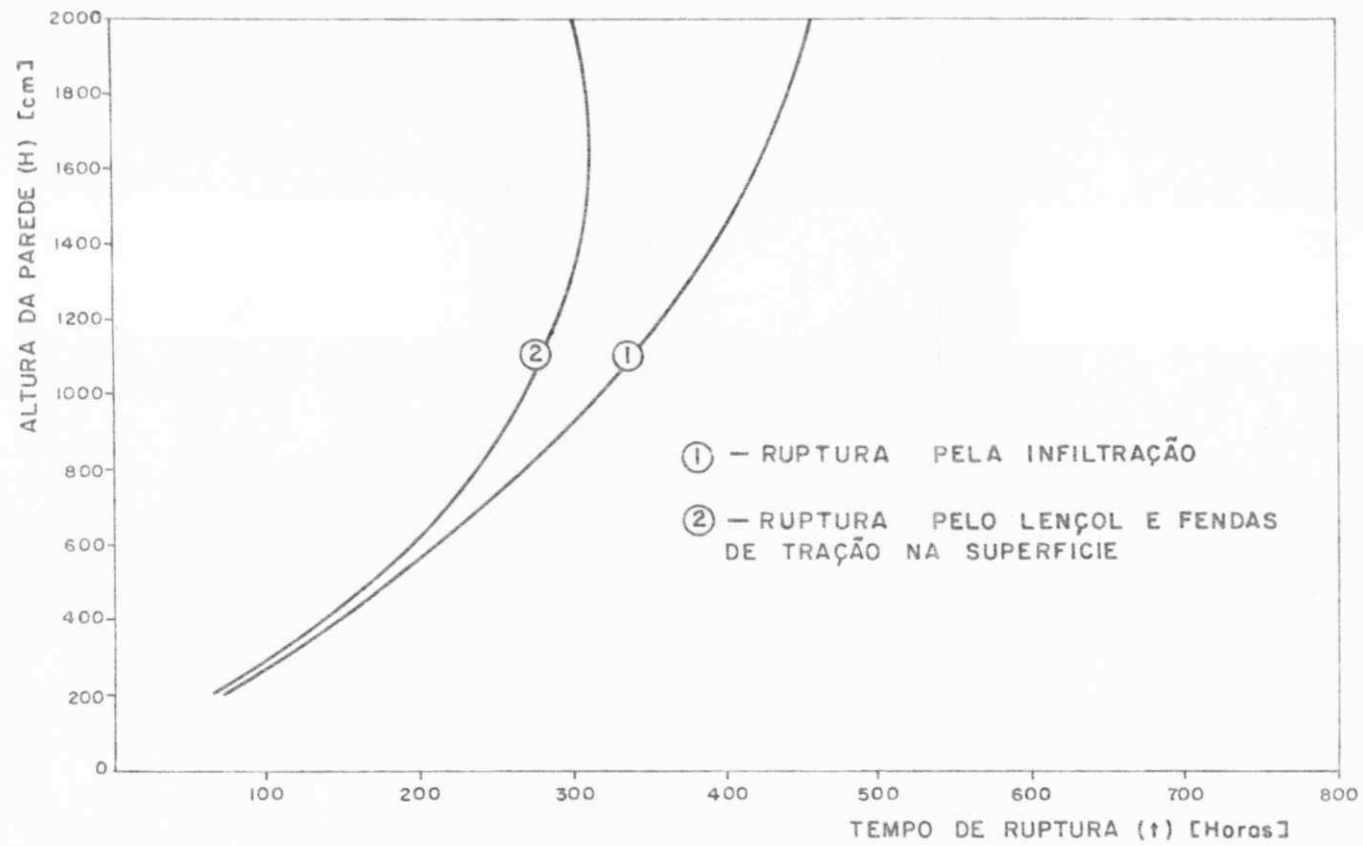


Fig. 5.2 - Variação do tempo de ruptura com a altura da ravina - $\alpha=90^\circ$.

terem sido computados relativamente à umidade inicial de 10 % , para todos os casos, para fins de comparação. Em termos reais, a infiltração é um processo dinâmico que depende de vários fatores. Em virtude da dinâmica do processo de infiltração durante as precipitações anteriores, as condições iniciais estariam mudando constantemente com o tempo, o que resultaria num menor tempo de ruptura para qualquer umidade inicial maior do que 10%. Além do mais, se a intensidade da precipitação (taxa de aplicação natural de água) é maior do que a capacidade de infiltração do solo (hipótese esta admitida no modelo), o escoamento superficial gerado pelo excedente de intensidade de chuva pode influir diretamente no alargamento lateral. Contudo, este aspecto não foi tratado neste trabalho.

Em termos do critério adotado para o cálculo do tempo de ruptura, ou seja associar a ocorrência da umidade crítica para o local onde a profundidade do solo para o plano de ruptura é a metade da profundidade máxima do plano, os resultados gerados podem, na prática, serem um pouco diferentes dos reais devido ao fato que ocorre uma variação da umidade ao longo do plano. Os critérios para previsões reais do cálculo do tempo de ruptura podem ser melhor desenvolvidos apenas com dados reais obtidos em cada local. Em termos de estimativa (previsão), o critério deve ser aquele que resulte no menor tempo de ruptura, o que é o objetivo deste trabalho.

Nas Tabelas do Anexo A.3 encontram-se os resultados obtidos quando se considera a influência do lençol freático no alargamento lateral. Tomando-se como exemplo a inclinação de

75 graus, pode-se observar que para uma umidade inicial menor do que 15,6% a altura da zona saturada necessária para provocar a ruptura é sempre crescente, com a altura da ravina, até a altura de 2000,00 cm. Para umidades iniciais maiores do que 15,6%, a zona saturada cresce com a altura da ravina até atingir um máximo e depois diminui, chegando, em alguns, casos ao valor zero. Isto é decorrente do fato de que quando a altura da parede da ravina cresce, o peso bruto da massa de solo também cresce de modo que, dependendo do valor da umidade inicial em que o solo se encontra, o incremento na saturação do solo, necessária para a ruptura, decresce. Obviamente, a altura da ravina para a qual a zona saturada necessária é zero rompe já na umidade inicial. Por exemplo, com a umidade inicial de 26,8% e altura da parede de 1850,00 cm a zona saturada necessária para a ruptura é zero. Isto implica que para a altura da ravina de 1850,00 cm, a umidade crítica já é 26,8%. Uma verificação da consistência deste resultado pode ser feita com as tabeas do Anexo A.1, onde apenas o efeito da infiltração foi considerado. Para a inclinação de 75 graus e a altura de 1850,00 cm a umidade crítica correspondente é 26,59%. A umidade de 26,8%, porém, corresponde à uma altura que se encontra entre 1800,00 cm e 1850,00 cm. Na realidade, o valor zero, para a zona saturada necessária correspondente à altura de 1850,00 cm, apresentado no anexo A.3, ocorre entre 1800,00 cm e 1850,00 cm: no entanto, por motivos de se evitar valores negativos da zona saturada, durante o processo de computação, o primeiro valor negativo encontrado foi transformado automaticamente em valor nulo. Assim, todos os resultados cuja

zona saturada requerida é zero correspondem à uma altura ligeiramente maior do que a real.

Os resultados apresentados nas tabelas do Anexo A.4, onde se avalia a influência da presença de fendas de tração na superfície juntamente com a influência do lençol freático, é semelhante aos do Anexo A.3. Todavia, a altura da zona saturada requerida para a ruptura das paredes é sempre menor quando se considera as fendas de tração. O Gráfico da Figura 5.3 compara os resultados das duas situações para a inclinação da parede de 90 graus e umidade inicial de 21,20%. Os resultados para o caso particular da parede vertical em que a fenda atinge a zona saturada são apresentados no Anexo 5, por conveniência.

As tabelas do Anexo A.5 mostram os resultados obtidos para o alargamento parcial, quando se considera a fenda de tração localizada na parede da ravina juntamente com a influência do lençol freático de acordo com a Figura 3.9. Para inclinações da parede inferiores a 90 graus, as condições são totalmente independentes da altura da parede. Pode-se observar que nestas condições a ruptura parcial pode ocorrer para alturas da zona saturada bastante baixas. Um outro fato interessante é observado para as condições saturadas; pode-se notar que para esta condição, com inclinações inferiores a 90 graus, a soma algébrica da zona saturada (z) mais a profundidade da fenda (h_f) resulta na altura mínima estabelecida pela equação (3.16), como por exemplo quando $\alpha = 75$ graus e $U = 38,00\%$, $z = 54,0$ cm e $h_f = 144,2$ cm. Para paredes verticais ($\alpha = 90$ graus) os resultados mostram que o

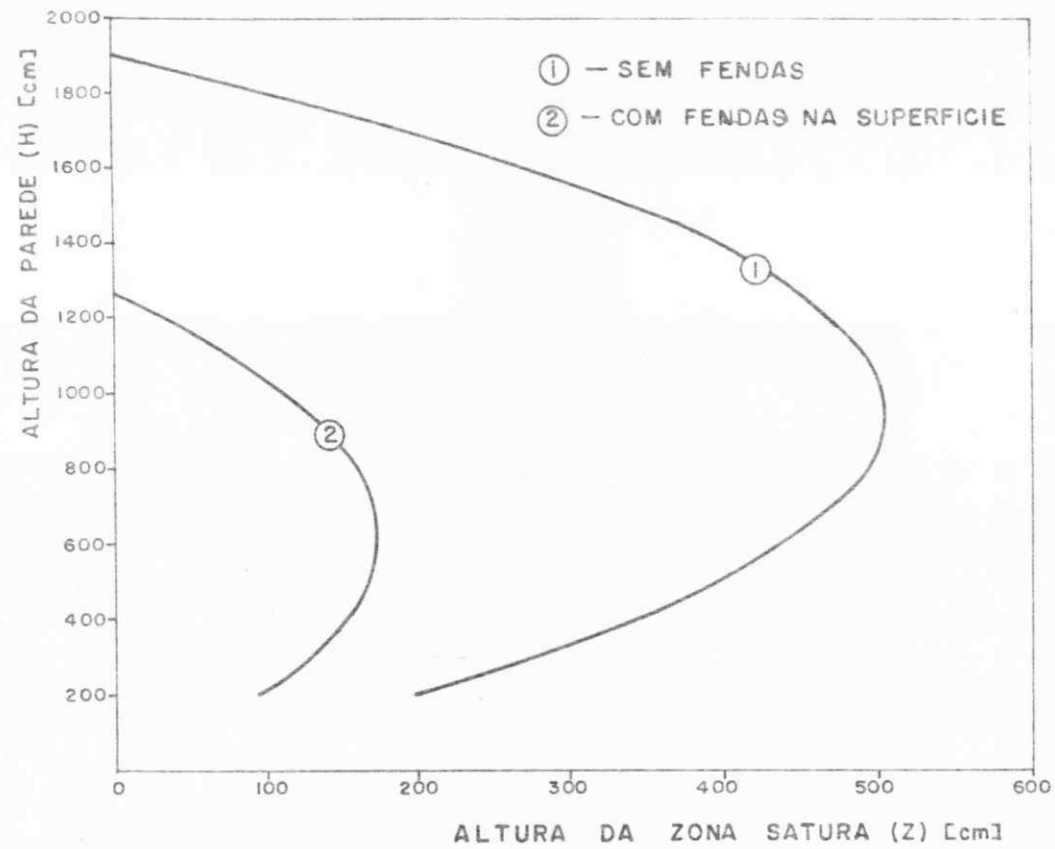


Fig. 5.3 - Variação da altura da zona saturada para ruptura das paredes com fendas na superfície e sem fendas. ($\alpha=90^\circ$; $U=21,20\%$)

alargamento lateral parcial pode ocorrer para alturas inferiores à altura mínima. Na condição úmida saturada, por exemplo, a ruptura parcial pode ocorrer para uma altura igual a metade da altura mínima, como por exemplo quando $\alpha = 90$ graus e $U = 38,00\%$, $z = 0$ e $h = 68,7$ cm, e portanto $H = 68,7$ cm = $H_{mi}/2$.

A influência do lençol freático no processo do alargamento lateral foi tomada em conta a partir da análise de estabilidade da parede lateral da ravina, quantificada para as condições críticas do processo de ruptura. Fisicamente, a zona saturada (z) depende basicamente das condições do solo tais como porosidade, tensão superficial e permeabilidade e da própria posição do lençol freático. Tomando-se a relação prática apresentada por Taylor (Equação 3.43) e admitindo-se uma permeabilidade saturada de $0,0004$ cm/s, obtém-se para o limite superior o valor de $z = 120,00$ cm. Comparando-se este valor com aqueles calculados, requeridos para a condição crítica de ruptura, pode-se notar que a maioria dos casos é fisicamente impossível de ocorrer pela capilaridade, a não ser quando o próprio lençol se encontra dentro da parede da ravina. Apenas para umidades iniciais relativamente altas uma pequena faixa de altura apresenta zonas saturadas requeridas fisicamente possíveis, exclusivamente pela subida capilar. Apenas quando se considera as fendas de tração ocorrendo na parede, as zonas saturadas requeridas são quase todas possíveis.

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões que se pode tirar, a partir deste trabalho, são:

1 - A erosão bruta produzida nas ravinas é altamente significativa e pode contribuir, em larga escala, para a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas. Entretanto, de acordo com os registros da literatura, as quantidades de solo erodidas das ravinas são altamente variáveis e são, em geral, um reflexo das condições físico-climáticas locais.

2 - Os principais mecanismos da erosão em ravinas resumem-se na perda de resistência natural do solo, por um lado, e no incremento de cargas ativas, por outro, devidos ao incremento da umidade do solo pela infiltração influenciando diretamente no principal estágio do desenvolvimento das ravinas que é o alargamento lateral por ruptura;

3 - O alargamento lateral de ravinas pode ser analisado como um processo de ruptura das paredes laterais, cujas condições críticas podem ser estabelecidas a partir da análise de estabilidade das paredes;

4 - Desde que as condições críticas foram estabelecidas levando-se em consideração a variação das condições físicas do solo com a umidade e associando-se as condições hidrometeorológicas, previstas ou existentes, com estas condições, pode-se prever a possibilidade ou não da ruptura ocorrer, bem como, o tempo necessário para a mesma;

5 - De acordo com os resultados gerados a partir das equações desenvolvidas, verifica-se perfeitamente que a infiltração, juntamente com a influência do lençol freático e das fendas de tração são os fatores que contribuem para o processo de ruptura, sendo que a influência do lençol e das fendas de tração aceleram este processo tornando-o mais crítico:

6 - Embora do ponto de vista da estabilidade das paredes a zona saturada, provocada pela influência do lençol freático, seja um fator relevante, a possibilidade física da ocorrência desta zona, pela capilaridade, é praticamente impossível, na maioria dos casos, quando se compara as mesmas com o limite prático apresentado por Taylor (Equação 3.43). Essa evidência denotaria, por conseguinte, uma menor relevância da influência do lençol, em termos físicos reais, no processo do alargamento lateral. Sendo assim, a infiltração juntamente com as fendas de tração seriam os fatores mais relevantes, com exceção dos casos em que a fenda se localize na parede da ravina. Contudo, como não foi considerada a possibilidade do lençol estar no corpo do sistema, isto é acima do pé da parede da ravina, é

impossível, a partir deste trabalho, se estabelecer ou não com segurança a magnitude da influência do lençol no alargamento lateral, devido ao fato de que, neste caso, outros fatores teriam que ser levados em consideração.

Recomenda-se que:

1 - Em termos da aplicação do modelo desenvolvido aos casos reais de campo, as condições físicas do solo em consideração devem ser estabelecidas, isto é, a variação da coesão e do ângulo de atrito interno com a umidade, e adaptadas à metodologia proposta neste trabalho;

2 - Critérios mais realistas para o cálculo do tempo de ruptura sejam procurados, de modo que os resultados gerados estejam o mais próximo daqueles medidos no campo;

3 - Estudos de campo sejam conduzidos de modo que se possa avaliar, e integrar ao modelo, a influência do escoamento superficial no processo do alargamento lateral.

4 - Outros trabalhos de pesquisa sejam feitos no sentido de se avaliar fatores tais como cobertura vegetal, forças do escoamento subterrâneo, declividade, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEER, C.E., and JOHNSON, H.P. - "Factors Related to Gully Growth in the Deep Loess Area of Western Iowa", United States Department of Agriculture (USDA), Miscellaneous Publication 970, pp. 37-43, 1965.
- BEREZANTZEV, V.G., MUSTAFAYEV, A.A., SIDOROV, N.N., KOVALYOV, I.V. & ALIEV, S.K. - "On the Strength of Some Soils", Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, vol. 1, pp. 11-19, 1969
- BENNETT, J.P. - "Concepts of Mathematical Modeling of Sediment Yield", Water Resources Research, American Geophysical Union, vol. 10, No. 3, pp. 485-492, 1974.
- BLONG, R.J. - "The Development of Discontinuous Gullies in a Pumice Catchment", American Journal of Sciences 268, pp. 369-383, 1970.
- BRADFORD, J.M., FARRELL, D.A., and LARSON, W.E. - "Mathematical Evaluation of Factors Affecting Gully Stability", Soil Science Society of America, Proceedings, vol. 37, pp. 103-107, 1973.
- BRADFORD, J.M., and PIEST, R.F. - "Gully Wall Stability in Loess-derived Alluvium", Soil Science Society of America, Journal, vol. 41, pp. 115-122, 1977.
- BRADFORD, J.M., PIEST, R.F., and SPOMER, R.G. - "Failure Sequence of Gully Headwalls in Western Iowa", Soil Science Society

- of America, Journal, vol. 42, pp. 323-328, 1978.
- BRICE, J.C. - "Erosion and Deposition in the Loess-mantled Great Plains, Medicine Creek Basin, Nebraska", United States Geological Survey, Professional Paper 352 H, 1966.
- BRYAN, K. - "Historic Evidence of Changes in the Channel of Rio Puerco, a Tributary of the Rio Grande in New Mexico", Journal of Geology, vol. 36, No. 3, pp. 265-282, 1928.
- DANIELS, R.B. - "Stream Trenching and Valley-slope Gullies", In: R.B. Daniels and R.H. Jordan (ed), Physiographic History and Soils, Entrenched Streams Systems, and Gullies, Harrison County Iowa, USDA, Technical Bulletin 1348, pp. 51-87, 1966
- DVORAK, V.I., and HEINEMANN, H.G. - "Cooperative Runoff and Sediment Investigations on Medicine Creek Watershed in Nebraska", USDA - Agricultural Research Service (ARS) 41-130, 1967.
- ELLISON, W.D. - "Soil Erosion Studies-Part 1", Agricultural Engineering, vol. 28, No. 4, pp. 145-146.
- FIORI, O.C. & SOARES, P.C. - "Aspectos Evolutivos das Vossorocas", Notícia Geomorgológica 16(32), pp. 114-124, Campinas, 1976.
- GLYMPH, L.M. - "Relation of Sedimentation to Accelerated Erosion in the Missouri River Basin", USDA - Soil Conservation Service (SCS), Technical Paper 102, 1951.
- GOTTSCHALK, L.C., and BRUNE, B.M. - "Sediment Design Criteria for the Missouri Basin Loess Hills", SCS, Technical Bulletin 97, 1950.
- GONG, S., and XIONG, G. - "The Origin and Transport of Sediment of the Yellow River", In: Symposium on River Sedimentation

- Chinese Society of Hydraulic Engineering, Beijing, Guanghai Press, Beijing, pp. 41-52, 1980.
- HANDY, R.J. - "Collapsible Loess in Iowa", Soil Science Society of America, Proceedings, vol. 37, pp. 281-284, 1973.
- IRELAND, H.A., SHARP, C.E., and EARGLE, D.H. - "Principles of Gully Erosion in the Piedmont of South Carolina", USDA, Technical Bulletin 633, 1939.
- IWASA, O.Y., e PRANDINI, F.L. - "Diagnóstico da Origem e Evolução de Boçorocas: Condição Fundamental para Prevenção e Correção", in: Simpósio sobre o Controle de Erosão, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, Anais, vol. 2, pp. 5-34, Curitiba, 1980.
- JUMIKIS, A.R. - Introduction to Soil Mechanics, publicado por D. Van Nostrand Company, New York, N.Y., 1967.
- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G., and MILLER, J.P. - Fluvial Processes in Geomorphology, W.H. Freeman and Co., San Francisco, California, 1964.
- LEOPOLD, L.B., EMMETT, W.W., and MYRICK, R.M. - "Channel and Hillslope Processes in a Semi-Arid Area in New Mexico", United States Geological Survey, Professional Paper 352 G, 1966.
- LOPES, V.L. - Um Estudo da Erosão e Produção de Sedimentos pelas Chuvas, Tese de Mestrado desenvolvida e apresentada no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1980.
- LOPES, V.L., e SRINIVASAN, V.S. - "Erosão Superficial e Produção de Sedimentos pelas Chuvas: O Estado de Conhecimento e Perspectivas", IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e

- Recursos Hídricos, Anais, vol. 1, pp. 228-244, Fortaleza, 1981.
- LOPES, V.L., e SRINIVASAN, V.S. - "Hidráulica da Erosão por Escoamento Superficial", Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Recursos Hídricos, vol. 1, No. 1, pp. 57-65, 1982
- LENCASTRE, A., e FRANCO, F.M. - Lições de Hidrologia, Universidade Nova de Lisboa, 1984.
- MILLER, C.R., WOODBURN, R., and TURNER, H.R. - "Upland Gully Sediment Production", International Association of Scientific Hydrology, Publication No. 59, pp. 83-104, 1962.
- MOU, J., and MENG, Q. - "Sediment Delivery Ratio as Used in the Computation of the Watershed Sediment Yield", Chinese Society of Hydraulic Engineering, Beijing, 1980.
- NASCIMENTO, V. - "Estudo da Regularização e Proteção das Barrocas de Luanda, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Publicação No. 30, Lisboa.
- PETERSON, H.V. - "The Problem of Gullying in Western Valleys", In: Trask, P.D. (ed), Applied Sedimentation, pp. 407-433, John Wiley and Sons, New York, 1950.
- PETIT, M., e BOURGEAT, F. - "Os Lavaca Malgaches: Um Agente Natural de Evolução das Vertentes", Traduzido por Olga B. de Lima, publicado no Boletim Geográfico No. 190, pp. 29-32, 1966.
- PIEST, R.F. - "Long-term Sediment Yields from Small Watersheds", International Association of Scientific Hydrology, Publication No. 65, 1964.
- PIEST, R.F., and SPOMER, R.G. - "Sheet and Gully Erosion in the Missouri Valley Loessial Region", Transactions, American

- Society of Agricultural Engineers (ASAE), vol. 11, pp. 850-853, 1968.
- PIEST, R.F., BRADFORD, J.M., and SPOMER, R.G. - "Mechanism of Erosion and Sediment Movement from Gullies", USDA - ARS-S-40, pp. 162-176.
- PICHLER, E. - "Boçorocas", Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, vol. 2, No. 1, pp. 3-16, 1950.
- PRANDINI, F.L. - "Occurrence of Boçorocas in Southern Brazil: Geological Conditioning of Environmental Degradation", 2th International Congress of International Association of Engineering of Geology, Proceedings, vol. 1, No. 36, pp. 1-7, São Paulo, 1974.
- PRANDINI, F.L. - "Special Types of Gullies", In: First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brazilian Society for Soil Mechanics, Progress Report (1981-1985), Theme 3: Peculiarities of "in situ" Behavior of Tropical Soils, Topic 3.1: Erosion, pp. 18-32, Brasilia, 1985.
- RODRIGUES, J.E., e VILLAR, O.M. - "Estudo da Erosão Interna em Boçorocas Através da Teoria do Carreamento", 40. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Anais, vol. 2, pp. 163-168, Belo Horizonte, 1984.
- RODRIGUES, J.E. - "Estudo Geotécnico de Fenômenos Erosivos Acelerados (Boçorocas)", 40. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Anais, vol. 2, pp. 169-182, Belo Horizonte, 1984.
- ROSSI, G., et SALOMON, J.N. - "Un Exemple d'Erosion Accélérée à Madagascar: Les Sakasakas", Z.Geomorph.N.F., 23(3), pp.

- 271-280, 1979.
- ROUGERIE, M.G. - "Os Lavaka na Evolução das Vertentes em Madagaskar", Traduzido por Olga B. de Lima, Publicado no Boletim Geográfico, No. 190, pp. 18-28, Rio de Janeiro, 1966.
- RUHE, R.V. - "Geomorphology of Parts of Greenfield Quadrangle, Adair County, Iowa", in: R.V. Ruhe, R.B. Daniels and J.G. Cady (ed), Landscape Evolution and Soil Formation in Southwestern Iowa, USDA, Technical Bulletin, No. 1349, pp. 93-161, 1967.
- SEGINER, I. - "Gully Development and Sediment Yield", The Ministry of Agriculture, Soil Conservation Division, Research Report, No. 13, 1966.
- SOIL CONSERVATION SERVICE, USDA - "Proceedings of Determining Rates of Land Damage, Land Depreciation, and Volume of Sediment Produced by Gully Erosion", Technical Release, No. 32, Geology, 1966.
- SRINIVASAN, V.S., e LOPES, V.L. - "Erosão Superficial e Avaliação da Produção de Sedimentos pelas Chuvas", X Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Anais, vol. II, pp. 143-151, México, 1982.
- TAYLOR, D.W. - Fundamentals of Soil Mechanics, New York, John Willey and Sons Inc., London, 1963.
- THOMPSON, J.R. - "Quantitative Effect of Watershed Variables on the Rate of Gully Head Advancement", Transactions, ASAE, vol. 7, No. 1, pp. 54-55, 1964.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA) - "Watershed of the Little Sioux River, 78th Congress, 1st Session, House

Doc., No. 268, 1943.

VANONI, V.A. - Sedimentation Engineering, American Society of Civil Engineering, Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 54, New York, 1975.

WOODRUFF, L.M. - "Agronomic Studies: Review of the Results Obtained at the Bethany Erosion Sediment Station", SCS, USDA, 1934 Annual Report, 1935.

WALLING, D.E. - "The Sediment Delivery Problem", Journal of Hydrology, No. 65, pp. 209-237.

ANEXO A: TABELAS

 ALARGAMENTO LATERAL DE RAVINAS

ANEXO A.1

ALARGAMENTO TOTAL PELA INFILTRAÇÃO	DADOS FÍSICOS DO SOLO
Capacidade de infiltração máxima	$q_0 = 60.00 \text{ mm/h}$
Capacidade de infiltração mínima	$q_f = 6.00 \text{ mm/h}$
Fator de amortecimento de Horton	$k = 0.50 \text{ h}$
Umidade inicial do solo	$U_0 = 10.00 \%$
Umidade do solo na saturação	$U_s = 38.00 \%$
Coesão do solo na umidade inicial	$C_0 = 8.50 \text{ t/m}^2$
Coesão do solo na saturação	$C_s = 0.50 \text{ t/m}^2$
Densidade dos grãos	$G = 2.99$
Índice de vazios do solo	$e = 1.14$
Peso específico do solo seco	$\gamma_s = 1.40 \text{ t/m}^3$
Ângulo de atrito na umidade inicial	$\phi_0 = 28.00 \text{ graus}$
Ângulo de atrito na saturação	$\phi_s = 16.00 \text{ graus}$

CONDIÇÕES CRÍTICAS DO ALARGAMENTO TOTAL POR RUPTURA

α (graus)	ϕ_c (graus)	H(cm)	U_c (%)	B (cm)	Q(cm)	t(horas)
75.00	16.01	200.0	37.98	142.9	38.7	46.4
75.00	16.19	250.0	37.56	177.9	47.7	61.5
75.00	16.37	300.0	37.14	212.5	56.6	76.3
75.00	16.54	350.0	36.73	246.9	65.2	90.6
75.00	16.72	400.0	36.33	281.0	73.6	104.6
75.00	16.89	450.0	35.93	314.8	81.8	118.3
75.00	17.06	500.0	35.53	348.4	89.8	131.6
75.00	17.22	550.0	35.14	381.7	97.6	144.6
75.00	17.39	600.0	34.76	414.7	105.1	157.2
75.00	17.55	650.0	34.38	447.5	112.5	169.6
75.00	17.71	700.0	34.01	480.1	119.8	181.6
75.00	17.87	750.0	33.64	512.4	126.8	193.3
75.00	18.02	800.0	33.28	544.5	133.6	204.7
75.00	18.18	850.0	32.92	576.4	140.3	215.9
75.00	18.33	900.0	32.57	608.0	146.8	226.7
75.00	18.48	950.0	32.22	639.5	153.2	237.3
75.00	18.63	1000.0	31.87	670.7	159.3	247.6
75.00	18.77	1050.0	31.53	701.7	165.3	257.6
75.00	18.92	1100.0	31.20	732.5	171.2	267.3
75.00	19.06	1150.0	30.87	763.2	176.9	276.8
75.00	19.20	1200.0	30.54	793.6	182.4	286.1
75.00	19.34	1250.0	30.21	823.8	187.8	295.1
75.00	19.47	1300.0	29.89	853.9	193.1	303.8
75.00	19.61	1350.0	29.58	883.8	198.2	312.3
75.00	19.74	1400.0	29.26	913.5	203.2	320.6
75.00	19.88	1450.0	28.95	943.0	208.0	328.7
75.00	20.01	1500.0	28.65	972.4	212.7	336.5
75.00	20.14	1550.0	28.34	1001.6	217.3	344.1
75.00	20.27	1600.0	28.04	1030.6	221.7	351.5
75.00	20.39	1650.0	27.75	1059.4	226.0	358.7
75.00	20.52	1700.0	27.46	1088.1	230.2	365.6
75.00	20.64	1750.0	27.17	1116.7	234.2	372.4
75.00	20.77	1800.0	26.88	1145.1	238.2	378.9
75.00	20.89	1850.0	26.59	1173.3	242.0	385.3
75.00	21.01	1900.0	26.31	1201.4	245.7	391.4
75.00	21.13	1950.0	26.04	1229.4	249.2	397.4
75.00	21.25	2000.0	25.76	1257.2	252.7	403.2

Altura Mínima = 198.2 cm

CONDIÇÕES CRÍTICAS DO ALARGAMENTO TOTAL POR RUPTURA

α (graus)	ϕ_c (graus)	H(cm)	U_c (%)	B (cm)	Q(cm)	t(horas)
90.00	16.33	200.0	37.23	149.8	52.1	68.8
90.00	16.59	250.0	36.63	186.4	64.1	88.8
90.00	16.84	300.0	36.04	222.6	75.6	108.1
90.00	17.09	350.0	35.46	258.6	86.8	126.7
90.00	17.33	400.0	34.89	294.2	97.6	144.7
90.00	17.57	450.0	34.33	329.5	108.1	162.1
90.00	17.81	500.0	33.78	364.5	118.1	178.9
90.00	18.04	550.0	33.23	399.3	127.9	195.1
90.00	18.27	600.0	32.70	433.8	137.3	210.8
90.00	18.50	650.0	32.17	468.0	146.3	225.8
90.00	18.72	700.0	31.66	501.9	155.0	240.4
90.00	18.94	750.0	31.15	535.6	163.4	254.4
90.00	19.15	800.0	30.64	569.0	171.5	267.8
90.00	19.36	850.0	30.15	602.2	179.3	280.8
90.00	19.57	900.0	29.66	635.2	186.8	293.3
90.00	19.78	950.0	29.18	667.9	193.9	305.2
90.00	19.98	1000.0	28.71	700.4	200.8	316.7
90.00	20.18	1050.0	28.24	732.7	207.4	327.7
90.00	20.38	1100.0	27.78	764.8	213.8	338.3
90.00	20.58	1150.0	27.32	796.7	219.8	348.4
90.00	20.77	1200.0	26.88	828.3	225.6	358.0
90.00	20.96	1250.0	26.43	859.8	231.2	367.3
90.00	21.14	1300.0	26.00	891.1	236.4	376.0
90.00	21.33	1350.0	25.57	922.1	241.5	384.4
90.00	21.51	1400.0	25.14	953.0	246.2	392.4
90.00	21.69	1450.0	24.72	983.7	250.8	399.9
90.00	21.87	1500.0	24.31	1014.3	255.1	407.1
90.00	22.04	1550.0	23.90	1044.6	259.1	413.9
90.00	22.22	1600.0	23.49	1074.8	262.9	420.2
90.00	22.39	1650.0	23.09	1104.8	266.5	426.2
90.00	22.56	1700.0	22.70	1134.6	269.9	431.9
90.00	22.73	1750.0	22.31	1164.3	273.1	437.1
90.00	22.89	1800.0	21.92	1193.8	276.0	442.0
90.00	23.06	1850.0	21.54	1223.2	278.8	446.6
90.00	23.22	1900.0	21.16	1252.4	281.3	450.8
90.00	23.38	1950.0	20.79	1281.5	283.6	454.6
90.00	23.53	2000.0	20.42	1310.4	285.7	458.2

Altura Mínima = 137.4 cm

 ALARGAMENTO LATERAL DE RAVINAS

ANEXO A.2

 ALARGAMENTO PARCIAL: FENDA NA SUPERFÍCIE DADOS FÍSICOS DO SOLO

Capacidade de infiltração máxima	$q_0 = 60.00 \text{ mm/h}$
Capacidade de infiltração mínima	$q_f = 6.00 \text{ mm/h}$
Fator de amortecimento de Horton	$k = 0.50 \text{ h}$
Umidade inicial do solo	$U_0 = 10.00 \%$
Umidade do solo na saturação	$U_f = 38.00 \%$
Coesão do solo na umidade inicial	$C_0 = 8.50 \text{ t/m}^2$
Coesão do solo na saturação	$C_s = 0.50 \text{ t/m}^2$
Densidade dos grãos	$G = 2.99$
Índice de vazios do solo	$\epsilon = 1.14$
Peso específico do solo seco	$\gamma_s = 1.40 \text{ t/m}^3$
Ângulo de atrito na umidade inicial	$\phi_0 = 28.00 \text{ graus}$
Ângulo de atrito na saturação	$\phi_s = 16.00 \text{ graus}$

CONDIÇÕES CRÍTICAS DO ALARGAMENTO PARCIAL - FENDA NA SUPERFÍCIE

α (graus)	ϕ_c (graus)	H (cm)	U_c (%)	B_1 (cm)	Q (cm)	t (horas)
75.00	16.23	200.0	37.45	48.8	38.1	45.4
75.00	16.47	250.0	36.91	60.8	46.8	60.0
75.00	16.69	300.0	36.38	72.6	55.3	74.1
75.00	16.92	350.0	35.86	84.4	63.5	87.8
75.00	17.14	400.0	35.35	96.0	71.4	101.0
75.00	17.35	450.0	34.85	107.6	79.1	113.8
75.00	17.56	500.0	34.35	119.1	86.5	126.2
75.00	17.77	550.0	33.87	130.5	93.7	138.1
75.00	17.97	600.0	33.40	141.9	100.6	149.7
75.00	18.17	650.0	32.93	153.1	107.3	160.9
75.00	18.37	700.0	32.48	164.3	113.8	171.7
75.00	18.56	750.0	32.03	175.4	120.1	182.2
75.00	18.75	800.0	31.59	186.4	126.2	192.3
75.00	18.94	850.0	31.15	197.4	132.1	202.1
75.00	19.12	900.0	30.72	208.3	137.7	211.6
75.00	19.30	950.0	30.30	219.1	143.2	220.7
75.00	19.47	1000.0	29.89	229.8	148.5	229.5
75.00	19.65	1050.0	29.49	240.5	153.6	238.1
75.00	19.82	1100.0	29.08	251.2	158.6	246.3
75.00	19.99	1150.0	28.69	261.7	163.3	254.2
75.00	20.16	1200.0	28.30	272.3	167.9	261.9
75.00	20.32	1250.0	27.92	282.7	172.4	269.3
75.00	20.48	1300.0	27.54	293.1	176.6	276.4
75.00	20.64	1350.0	27.17	303.5	180.7	283.2
75.00	20.80	1400.0	26.81	313.8	184.7	289.8
75.00	20.95	1450.0	26.44	324.0	188.5	296.2
75.00	21.10	1500.0	26.09	334.2	192.1	302.2
75.00	21.26	1550.0	25.74	344.3	195.7	308.1
75.00	21.40	1600.0	25.39	354.4	199.0	313.7
75.00	21.55	1650.0	25.05	364.4	202.3	319.1
75.00	21.69	1700.0	24.71	374.4	205.4	324.3
75.00	21.84	1750.0	24.38	384.4	208.3	329.2
75.00	21.98	1800.0	24.05	394.3	211.2	333.9
75.00	22.12	1850.0	23.73	404.1	213.9	338.5
75.00	22.25	1900.0	23.41	413.9	216.5	342.8
75.00	22.39	1950.0	23.09	423.7	218.9	346.9
75.00	22.52	2000.0	22.78	433.4	221.3	350.8

CONDIÇÕES CRÍTICAS DO ALARGAMENTO PARCIAL - FENDA NA SUPERFÍCIE

α (graus)	ϕ (graus)	H (cm)	U_c (%)	B_1 (cm)	Q (cm)	t (horas)
90.00	16.84	200.0	36.04	74.2	50.4	66.0
90.00	17.21	250.0	35.17	92.1	61.5	84.5
90.00	17.57	300.0	34.33	109.8	72.0	102.1
90.00	17.93	350.0	33.50	127.3	82.0	118.7
90.00	18.27	400.0	32.70	144.6	91.5	134.5
90.00	18.61	450.0	31.91	161.7	100.5	149.4
90.00	18.94	500.0	31.15	178.5	108.9	163.6
90.00	19.26	550.0	30.40	195.2	117.0	176.9
90.00	19.57	600.0	29.66	211.7	124.5	189.5
90.00	19.88	650.0	28.94	228.1	131.6	201.3
90.00	20.18	700.0	28.24	244.2	138.3	212.5
90.00	20.48	750.0	27.55	260.3	144.6	222.9
90.00	20.77	800.0	26.88	276.1	150.4	232.7
90.00	21.05	850.0	26.21	291.8	155.9	241.8
90.00	21.33	900.0	25.57	307.4	161.0	250.3
90.00	21.60	950.0	24.93	322.8	165.7	258.1
90.00	21.87	1000.0	24.31	338.1	170.0	265.4
90.00	22.13	1050.0	23.69	353.2	174.0	272.1
90.00	22.39	1100.0	23.09	368.3	177.7	278.2
90.00	22.64	1150.0	22.50	383.2	181.0	283.7
90.00	22.89	1200.0	21.92	398.0	184.0	288.7
90.00	23.14	1250.0	21.35	412.6	186.7	293.2
90.00	23.38	1300.0	20.79	427.2	189.1	297.1
90.00	23.61	1350.0	20.24	441.6	191.1	300.5
90.00	23.85	1400.0	19.69	455.9	192.9	303.5
90.00	24.07	1450.0	19.16	470.2	194.4	305.9
90.00	24.30	1500.0	18.64	484.3	195.6	307.9
90.00	24.52	1550.0	18.12	498.3	196.5	309.5
90.00	24.74	1600.0	17.61	512.2	197.1	310.5
90.00	24.95	1650.0	17.11	526.1	197.5	311.2
90.00	25.16	1700.0	16.62	539.8	197.6	311.4
90.00	25.37	1750.0	16.13	553.4	197.5	311.1
90.00	25.58	1800.0	15.65	567.0	197.1	310.5
90.00	25.78	1850.0	15.18	580.5	196.5	309.4
90.00	25.98	1900.0	14.71	593.9	195.6	308.0
90.00	26.18	1950.0	14.26	607.2	194.5	306.1
90.00	26.37	2000.0	13.80	620.4	193.1	303.9

 ALARGAMENTO LATERAL DE RAVINAS

ANEXO A.3

ALARGAMENTO TOTAL PELO LENÇOL	DADOS FÍSICOS DO SOLO
Umidade inicial do solo	$U_0 = 10.00 \%$
Umidade do solo na saturação	$U_S = 38.00 \%$
Coesão do solo na umidade inicial	$C_0 = 8.50 \text{ t/m}^2$
Coesão do solo na saturação	$C_S = 0.50 \text{ t/m}^2$
Peso específico do solo seco	$\gamma_S = 1.40 \text{ t/m}^3$
Ângulo de atrito na umidade inicial	$\phi_0 = 28.00 \text{ graus}$
Ângulo de atrito na saturação	$\phi_S = 16.00 \text{ graus}$

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamiento total

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
75.00	28.00	300.0	10.00	298.5
75.00	28.00	350.0	10.00	344.5
75.00	28.00	400.0	10.00	389.4
75.00	28.00	450.0	10.00	433.2
75.00	28.00	500.0	10.00	476.0
75.00	28.00	550.0	10.00	517.8
75.00	28.00	600.0	10.00	558.6
75.00	28.00	650.0	10.00	598.5
75.00	28.00	700.0	10.00	637.3
75.00	28.00	750.0	10.00	675.1
75.00	28.00	800.0	10.00	712.0
75.00	28.00	850.0	10.00	747.9
75.00	28.00	900.0	10.00	782.9
75.00	28.00	950.0	10.00	816.9
75.00	28.00	1000.0	10.00	850.1
75.00	28.00	1050.0	10.00	882.2
75.00	28.00	1100.0	10.00	913.5
75.00	28.00	1150.0	10.00	943.9
75.00	28.00	1200.0	10.00	973.3
75.00	28.00	1250.0	10.00	1001.9
75.00	28.00	1300.0	10.00	1029.6
75.00	28.00	1350.0	10.00	1056.4
75.00	28.00	1400.0	10.00	1082.3
75.00	28.00	1450.0	10.00	1107.3
75.00	28.00	1500.0	10.00	1131.5
75.00	28.00	1550.0	10.00	1154.8
75.00	28.00	1600.0	10.00	1177.3
75.00	28.00	1650.0	10.00	1198.9
75.00	28.00	1700.0	10.00	1219.7
75.00	28.00	1750.0	10.00	1239.6
75.00	28.00	1800.0	10.00	1258.7
75.00	28.00	1850.0	10.00	1277.0
75.00	28.00	1900.0	10.00	1294.4
75.00	28.00	1950.0	10.00	1311.0
75.00	28.00	2000.0	10.00	1326.8

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamiento total

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
75.00	25.60	300.0	15.60	296.3
75.00	25.60	350.0	15.60	340.6
75.00	25.60	400.0	15.60	383.5
75.00	25.60	450.0	15.60	425.0
75.00	25.60	500.0	15.60	465.1
75.00	25.60	550.0	15.60	503.8
75.00	25.60	600.0	15.60	541.2
75.00	25.60	650.0	15.60	577.3
75.00	25.60	700.0	15.60	612.1
75.00	25.60	750.0	15.60	645.6
75.00	25.60	800.0	15.60	677.7
75.00	25.60	850.0	15.60	708.6
75.00	25.60	900.0	15.60	738.3
75.00	25.60	950.0	15.60	766.6
75.00	25.60	1000.0	15.60	793.7
75.00	25.60	1050.0	15.60	819.6
75.00	25.60	1100.0	15.60	844.3
75.00	25.60	1150.0	15.60	867.7
75.00	25.60	1200.0	15.60	889.9
75.00	25.60	1250.0	15.60	910.9
75.00	25.60	1300.0	15.60	930.7
75.00	25.60	1350.0	15.60	949.3
75.00	25.60	1400.0	15.60	966.7
75.00	25.60	1450.0	15.60	983.0
75.00	25.60	1500.0	15.60	998.0
75.00	25.60	1550.0	15.60	1011.9
75.00	25.60	1600.0	15.60	1024.6
75.00	25.60	1650.0	15.60	1036.2
75.00	25.60	1700.0	15.60	1046.6
75.00	25.60	1750.0	15.60	1055.8
75.00	25.60	1800.0	15.60	1063.9
75.00	25.60	1850.0	15.60	1070.8
75.00	25.60	1900.0	15.60	1076.6
75.00	25.60	1950.0	15.60	1081.2
75.00	25.60	2000.0	15.60	1084.7

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento total

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
75.00	23.20	300.0	21.20	292.6
75.00	23.20	350.0	21.20	334.1
75.00	23.20	400.0	21.20	373.5
75.00	23.20	450.0	21.20	411.1
75.00	23.20	500.0	21.20	446.6
75.00	23.20	550.0	21.20	480.2
75.00	23.20	600.0	21.20	512.0
75.00	23.20	650.0	21.20	541.8
75.00	23.20	700.0	21.20	569.7
75.00	23.20	750.0	21.20	595.8
75.00	23.20	800.0	21.20	620.0
75.00	23.20	850.0	21.20	642.4
75.00	23.20	900.0	21.20	662.9
75.00	23.20	950.0	21.20	681.7
75.00	23.20	1000.0	21.20	698.6
75.00	23.20	1050.0	21.20	713.8
75.00	23.20	1100.0	21.20	727.1
75.00	23.20	1150.0	21.20	738.7
75.00	23.20	1200.0	21.20	748.5
75.00	23.20	1250.0	21.20	756.6
75.00	23.20	1300.0	21.20	762.8
75.00	23.20	1350.0	21.20	767.4
75.00	23.20	1400.0	21.20	770.1
75.00	23.20	1450.0	21.20	771.1
75.00	23.20	1500.0	21.20	770.4
75.00	23.20	1550.0	21.20	767.8
75.00	23.20	1600.0	21.20	763.6
75.00	23.20	1650.0	21.20	757.5
75.00	23.20	1700.0	21.20	749.7
75.00	23.20	1750.0	21.20	740.2
75.00	23.20	1800.0	21.20	728.8
75.00	23.20	1850.0	21.20	715.7
75.00	23.20	1900.0	21.20	700.8
75.00	23.20	1950.0	21.20	684.1
75.00	23.20	2000.0	21.20	665.6

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento total

α (graus)	ϕ (graus)	H (cm)	U (%)	z (cm)
75.00	20.80	300.0	26.80	284.9
75.00	20.80	350.0	26.80	320.8
75.00	20.80	400.0	26.80	353.5
75.00	20.80	450.0	26.80	383.0
75.00	20.80	500.0	26.80	409.3
75.00	20.80	550.0	26.80	432.6
75.00	20.80	600.0	26.80	452.7
75.00	20.80	650.0	26.80	469.8
75.00	20.80	700.0	26.80	483.8
75.00	20.80	750.0	26.80	494.8
75.00	20.80	800.0	26.80	502.8
75.00	20.80	850.0	26.80	507.7
75.00	20.80	900.0	26.80	509.7
75.00	20.80	950.0	26.80	508.6
75.00	20.80	1000.0	26.80	504.5
75.00	20.80	1050.0	26.80	497.3
75.00	20.80	1100.0	26.80	487.2
75.00	20.80	1150.0	26.80	474.0
75.00	20.80	1200.0	26.80	457.8
75.00	20.80	1250.0	26.80	438.4
75.00	20.80	1300.0	26.80	416.1
75.00	20.80	1350.0	26.80	390.6
75.00	20.80	1400.0	26.80	361.9
75.00	20.80	1450.0	26.80	330.2
75.00	20.80	1500.0	26.80	295.2
75.00	20.80	1550.0	26.80	257.0
75.00	20.80	1600.0	26.80	215.5
75.00	20.80	1650.0	26.80	170.7
75.00	20.80	1700.0	26.80	122.5
75.00	20.80	1750.0	26.80	70.9
75.00	20.80	1800.0	26.80	15.8
75.00	20.80	1850.0	26.80	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento total

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
75.00	18.40	300.0	32.40	261.8
75.00	18.40	350.0	32.40	280.6
75.00	18.40	400.0	32.40	292.6
75.00	18.40	450.0	32.40	297.7
75.00	18.40	500.0	32.40	295.9
75.00	18.40	550.0	32.40	287.2
75.00	18.40	600.0	32.40	271.7
75.00	18.40	650.0	32.40	249.2
75.00	18.40	700.0	32.40	219.8
75.00	18.40	750.0	32.40	183.3
75.00	18.40	800.0	32.40	139.7
75.00	18.40	850.0	32.40	88.9
75.00	18.40	900.0	32.40	30.6
75.00	18.40	950.0	32.40	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento total

 α (graus) ϕ (graus) H(cm) U (%) z(cm)

SE A UMIDADE INICIAL É A UMIDADE SATURADA, A RUPTURA OCORERÁ PARA QUALQUER ALTURA MAIOR OU IGUAL A ALTURA MÍNIMA INDEPENDENTEMENTE DA ZONA SATURADA

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento total

α (graus)	ϕ (graus)	H (cm)	U (%)	z (cm)
90.00	28.00	200.0	10.00	198.0
90.00	28.00	250.0	10.00	243.2
90.00	28.00	300.0	10.00	286.7
90.00	28.00	350.0	10.00	328.5
90.00	28.00	400.0	10.00	368.7
90.00	28.00	450.0	10.00	407.4
90.00	28.00	500.0	10.00	444.4
90.00	28.00	550.0	10.00	479.9
90.00	28.00	600.0	10.00	514.0
90.00	28.00	650.0	10.00	546.5
90.00	28.00	700.0	10.00	577.5
90.00	28.00	750.0	10.00	607.1
90.00	28.00	800.0	10.00	635.2
90.00	28.00	850.0	10.00	662.0
90.00	28.00	900.0	10.00	687.3
90.00	28.00	950.0	10.00	711.2
90.00	28.00	1000.0	10.00	733.7
90.00	28.00	1050.0	10.00	754.9
90.00	28.00	1100.0	10.00	774.7
90.00	28.00	1150.0	10.00	793.1
90.00	28.00	1200.0	10.00	810.3
90.00	28.00	1250.0	10.00	826.1
90.00	28.00	1300.0	10.00	840.6
90.00	28.00	1350.0	10.00	853.7
90.00	28.00	1400.0	10.00	865.6
90.00	28.00	1450.0	10.00	876.2
90.00	28.00	1500.0	10.00	885.4
90.00	28.00	1550.0	10.00	893.4
90.00	28.00	1600.0	10.00	900.1
90.00	28.00	1650.0	10.00	905.5
90.00	28.00	1700.0	10.00	909.7
90.00	28.00	1750.0	10.00	912.5
90.00	28.00	1800.0	10.00	914.1
90.00	28.00	1850.0	10.00	914.4
90.00	28.00	1900.0	10.00	913.4
90.00	28.00	1950.0	10.00	911.2
90.00	28.00	2000.0	10.00	907.7

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento total

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
90.00	25.60	200.0	15.60	196.7
90.00	25.60	250.0	15.60	240.2
90.00	25.60	300.0	15.60	281.5
90.00	25.60	350.0	15.60	320.6
90.00	25.60	400.0	15.60	357.7
90.00	25.60	450.0	15.60	392.6
90.00	25.60	500.0	15.60	425.6
90.00	25.60	550.0	15.60	456.5
90.00	25.60	600.0	15.60	485.4
90.00	25.60	650.0	15.60	512.3
90.00	25.60	700.0	15.60	537.3
90.00	25.60	750.0	15.60	560.4
90.00	25.60	800.0	15.60	581.6
90.00	25.60	850.0	15.60	600.9
90.00	25.60	900.0	15.60	618.3
90.00	25.60	950.0	15.60	633.9
90.00	25.60	1000.0	15.60	647.7
90.00	25.60	1050.0	15.60	659.6
90.00	25.60	1100.0	15.60	669.6
90.00	25.60	1150.0	15.60	677.9
90.00	25.60	1200.0	15.60	684.3
90.00	25.60	1250.0	15.60	689.0
90.00	25.60	1300.0	15.60	691.8
90.00	25.60	1350.0	15.60	692.9
90.00	25.60	1400.0	15.60	692.1
90.00	25.60	1450.0	15.60	689.6
90.00	25.60	1500.0	15.60	685.2
90.00	25.60	1550.0	15.60	679.1
90.00	25.60	1600.0	15.60	671.1
90.00	25.60	1650.0	15.60	661.3
90.00	25.60	1700.0	15.60	649.7
90.00	25.60	1750.0	15.60	636.3
90.00	25.60	1800.0	15.60	621.0
90.00	25.60	1850.0	15.60	603.9
90.00	25.60	1900.0	15.60	584.9
90.00	25.60	1950.0	15.60	564.0
90.00	25.60	2000.0	15.60	541.2

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento total

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
90.00	23.20	200.0	21.20	194.5
90.00	23.20	250.0	21.20	235.2
90.00	23.20	300.0	21.20	272.8
90.00	23.20	350.0	21.20	307.4
90.00	23.20	400.0	21.20	339.1
90.00	23.20	450.0	21.20	367.9
90.00	23.20	500.0	21.20	393.9
90.00	23.20	550.0	21.20	417.0
90.00	23.20	600.0	21.20	437.3
90.00	23.20	650.0	21.20	454.8
90.00	23.20	700.0	21.20	469.6
90.00	23.20	750.0	21.20	481.6
90.00	23.20	800.0	21.20	490.9
90.00	23.20	850.0	21.20	497.5
90.00	23.20	900.0	21.20	501.4
90.00	23.20	950.0	21.20	502.6
90.00	23.20	1000.0	21.20	501.2
90.00	23.20	1050.0	21.20	497.0
90.00	23.20	1100.0	21.20	490.1
90.00	23.20	1150.0	21.20	480.5
90.00	23.20	1200.0	21.20	468.2
90.00	23.20	1250.0	21.20	453.1
90.00	23.20	1300.0	21.20	435.3
90.00	23.20	1350.0	21.20	414.7
90.00	23.20	1400.0	21.20	391.3
90.00	23.20	1450.0	21.20	365.1
90.00	23.20	1500.0	21.20	336.0
90.00	23.20	1550.0	21.20	304.0
90.00	23.20	1600.0	21.20	269.0
90.00	23.20	1650.0	21.20	231.1
90.00	23.20	1700.0	21.20	190.1
90.00	23.20	1750.0	21.20	146.0
90.00	23.20	1800.0	21.20	98.7
90.00	23.20	1850.0	21.20	48.1
90.00	23.20	1900.0	21.20	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento total

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
90.00	20.80	200.0	26.80	189.9
90.00	20.80	250.0	26.80	225.0
90.00	20.80	300.0	26.80	255.3
90.00	20.80	350.0	26.80	280.8
90.00	20.80	400.0	26.80	301.7
90.00	20.80	450.0	26.80	318.0
90.00	20.80	500.0	26.80	329.8
90.00	20.80	550.0	26.80	336.9
90.00	20.80	600.0	26.80	339.6
90.00	20.80	650.0	26.80	337.7
90.00	20.80	700.0	26.80	331.3
90.00	20.80	750.0	26.80	320.3
90.00	20.80	800.0	26.80	304.8
90.00	20.80	850.0	26.80	284.7
90.00	20.80	900.0	26.80	260.0
90.00	20.80	950.0	26.80	230.5
90.00	20.80	1000.0	26.80	196.3
90.00	20.80	1050.0	26.80	157.2
90.00	20.80	1100.0	26.80	113.1
90.00	20.80	1150.0	26.80	64.0
90.00	20.80	1200.0	26.80	9.8
90.00	20.80	1250.0	26.80	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento total

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z (cm)
90.00	18.40	200.0	32.40	176.2
90.00	18.40	250.0	32.40	194.2
90.00	18.40	300.0	32.40	202.1
90.00	18.40	350.0	32.40	200.0
90.00	18.40	400.0	32.40	187.7
90.00	18.40	450.0	32.40	165.2
90.00	18.40	500.0	32.40	132.5
90.00	18.40	550.0	32.40	89.3
90.00	18.40	600.0	32.40	35.4
90.00	18.40	650.0	32.40	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento total

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
SE A UMIDADE INICIAL É A UMIDADE SATURADA, A RUPTURA OCORERÁ PARA QUALQUER ALTURA MAIOR OU IGUAL A ALTURA MÍNIMA INDEPENDENTEMENTE DA ZONA SATURADA				

ALARGAMENTO LATERAL DE RAVINAS

ANEXO A.4

ALARGAMENTO PARCIAL: LENCOL+FENDA NA SUP. DADOS FÍSICOS DO SOLO

Umidade inicial do solo	$U_0 = 10.00 \%$
Umidade do solo na saturação	$U_S = 38.00 \%$
Coesão do solo na umidade inicial	$C_0 = 8.50 \text{ t/m}^2$
Coesão do solo na saturação	$C_S = 0.50 \text{ t/m}^2$
Peso específico do solo seco	$\gamma_S = 1.40 \text{ t/m}^3$
Ângulo de atrito na umidade inicial	$\phi_0 = 28.00 \text{ graus}$
Ângulo de atrito na saturação	$\phi_S = 16.00 \text{ graus}$

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H (cm)	U (%)	z (cm)
75.00	28.00	300.0	10.00	171.8
75.00	28.00	350.0	10.00	197.9
75.00	28.00	400.0	10.00	223.3
75.00	28.00	450.0	10.00	248.0
75.00	28.00	500.0	10.00	272.0
75.00	28.00	550.0	10.00	295.3
75.00	28.00	600.0	10.00	317.9
75.00	28.00	650.0	10.00	339.9
75.00	28.00	700.0	10.00	361.1
75.00	28.00	750.0	10.00	381.7
75.00	28.00	800.0	10.00	401.6
75.00	28.00	850.0	10.00	420.9
75.00	28.00	900.0	10.00	439.4
75.00	28.00	950.0	10.00	457.3
75.00	28.00	1000.0	10.00	474.6
75.00	28.00	1050.0	10.00	491.2
75.00	28.00	1100.0	10.00	507.1
75.00	28.00	1150.0	10.00	522.4
75.00	28.00	1200.0	10.00	537.0
75.00	28.00	1250.0	10.00	551.0
75.00	28.00	1300.0	10.00	564.4
75.00	28.00	1350.0	10.00	577.1
75.00	28.00	1400.0	10.00	589.2
75.00	28.00	1450.0	10.00	600.6
75.00	28.00	1500.0	10.00	611.4
75.00	28.00	1550.0	10.00	621.5
75.00	28.00	1600.0	10.00	631.1
75.00	28.00	1650.0	10.00	640.0
75.00	28.00	1700.0	10.00	648.2
75.00	28.00	1750.0	10.00	655.9
75.00	28.00	1800.0	10.00	662.9
75.00	28.00	1850.0	10.00	669.3
75.00	28.00	1900.0	10.00	675.1
75.00	28.00	1950.0	10.00	680.2
75.00	28.00	2000.0	10.00	684.7

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H (cm)	U (%)	z (cm)
75.00	25.60	300.0	15.60	165.9
75.00	25.60	350.0	15.60	190.1
75.00	25.60	400.0	15.60	213.4
75.00	25.60	450.0	15.60	235.7
75.00	25.60	500.0	15.60	257.1
75.00	25.60	550.0	15.60	277.5
75.00	25.60	600.0	15.60	297.0
75.00	25.60	650.0	15.60	315.6
75.00	25.60	700.0	15.60	333.3
75.00	25.60	750.0	15.60	350.1
75.00	25.60	800.0	15.60	365.9
75.00	25.60	850.0	15.60	380.8
75.00	25.60	900.0	15.60	394.8
75.00	25.60	950.0	15.60	408.0
75.00	25.60	1000.0	15.60	420.2
75.00	25.60	1050.0	15.60	431.5
75.00	25.60	1100.0	15.60	441.9
75.00	25.60	1150.0	15.60	451.5
75.00	25.60	1200.0	15.60	460.1
75.00	25.60	1250.0	15.60	467.9
75.00	25.60	1300.0	15.60	474.8
75.00	25.60	1350.0	15.60	480.8
75.00	25.60	1400.0	15.60	486.0
75.00	25.60	1450.0	15.60	490.2
75.00	25.60	1500.0	15.60	493.6
75.00	25.60	1550.0	15.60	496.1
75.00	25.60	1600.0	15.60	497.7
75.00	25.60	1650.0	15.60	498.4
75.00	25.60	1700.0	15.60	498.3
75.00	25.60	1750.0	15.60	497.3
75.00	25.60	1800.0	15.60	495.4
75.00	25.60	1850.0	15.60	492.7
75.00	25.60	1900.0	15.60	489.0
75.00	25.60	1950.0	15.60	484.5
75.00	25.60	2000.0	15.60	479.1

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
75.00	23.20	300.0	21.20	158.5
75.00	23.20	350.0	21.20	180.0
75.00	23.20	400.0	21.20	200.1
75.00	23.20	450.0	21.20	218.8
75.00	23.20	500.0	21.20	236.2
75.00	23.20	550.0	21.20	252.3
75.00	23.20	600.0	21.20	267.0
75.00	23.20	650.0	21.20	280.3
75.00	23.20	700.0	21.20	292.3
75.00	23.20	750.0	21.20	303.0
75.00	23.20	800.0	21.20	312.4
75.00	23.20	850.0	21.20	320.4
75.00	23.20	900.0	21.20	327.1
75.00	23.20	950.0	21.20	332.5
75.00	23.20	1000.0	21.20	336.6
75.00	23.20	1050.0	21.20	339.4
75.00	23.20	1100.0	21.20	340.9
75.00	23.20	1150.0	21.20	341.0
75.00	23.20	1200.0	21.20	339.9
75.00	23.20	1250.0	21.20	337.4
75.00	23.20	1300.0	21.20	333.6
75.00	23.20	1350.0	21.20	328.5
75.00	23.20	1400.0	21.20	322.1
75.00	23.20	1450.0	21.20	314.4
75.00	23.20	1500.0	21.20	305.4
75.00	23.20	1550.0	21.20	295.0
75.00	23.20	1600.0	21.20	283.3
75.00	23.20	1650.0	21.20	270.2
75.00	23.20	1700.0	21.20	255.9
75.00	23.20	1750.0	21.20	240.1
75.00	23.20	1800.0	21.20	223.1
75.00	23.20	1850.0	21.20	204.6
75.00	23.20	1900.0	21.20	184.8
75.00	23.20	1950.0	21.20	163.7
75.00	23.20	2000.0	21.20	141.1

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
75.00	20.80	300.0	26.80	147.2
75.00	20.80	350.0	26.80	163.8
75.00	20.80	400.0	26.80	178.2
75.00	20.80	450.0	26.80	190.3
75.00	20.80	500.0	26.80	200.2
75.00	20.80	550.0	26.80	207.9
75.00	20.80	600.0	26.80	213.4
75.00	20.80	650.0	26.80	216.7
75.00	20.80	700.0	26.80	217.8
75.00	20.80	750.0	26.80	216.7
75.00	20.80	800.0	26.80	213.5
75.00	20.80	850.0	26.80	208.0
75.00	20.80	900.0	26.80	200.3
75.00	20.80	950.0	26.80	190.4
75.00	20.80	1000.0	26.80	178.4
75.00	20.80	1050.0	26.80	164.0
75.00	20.80	1100.0	26.80	147.5
75.00	20.80	1150.0	26.80	128.7
75.00	20.80	1200.0	26.80	107.6
75.00	20.80	1250.0	26.80	84.3
75.00	20.80	1300.0	26.80	58.7
75.00	20.80	1350.0	26.80	30.8
75.00	20.80	1400.0	26.80	0.5
75.00	20.80	1450.0	26.80	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
75.00	18.40	300.0	32.40	120.2
75.00	18.40	350.0	32.40	123.0
75.00	18.40	400.0	32.40	121.0
75.00	18.40	450.0	32.40	114.1
75.00	18.40	500.0	32.40	102.3
75.00	18.40	550.0	32.40	85.6
75.00	18.40	600.0	32.40	64.0
75.00	18.40	650.0	32.40	37.4
75.00	18.40	700.0	32.40	5.8
75.00	18.40	750.0	32.40	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
------------------	----------------	-------	-------	-------

SE A UMIDADE INICIAL É A UMIDADE SATURADA, A RUPTURA OCORERÁ PARA QUALQUER ALTURA MAIOR OU IGUAL A ALTURA MÍNIMA INDEPENDENTEMENTE DA ZONA SATURADA

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H (cm)	U (%)	z (cm)
90.00	28.00	200.0	10.00	96.9
90.00	28.00	250.0	10.00	118.2
90.00	28.00	300.0	10.00	138.4
90.00	28.00	350.0	10.00	157.5
90.00	28.00	400.0	10.00	175.5
90.00	28.00	450.0	10.00	192.4
90.00	28.00	500.0	10.00	208.2
90.00	28.00	550.0	10.00	222.9
90.00	28.00	600.0	10.00	236.6
90.00	28.00	650.0	10.00	249.1
90.00	28.00	700.0	10.00	260.6
90.00	28.00	750.0	10.00	271.0
90.00	28.00	800.0	10.00	280.4
90.00	28.00	850.0	10.00	288.7
90.00	28.00	900.0	10.00	296.0
90.00	28.00	950.0	10.00	302.2
90.00	28.00	1000.0	10.00	307.4
90.00	28.00	1050.0	10.00	311.6
90.00	28.00	1100.0	10.00	314.7
90.00	28.00	1150.0	10.00	316.7
90.00	28.00	1200.0	10.00	317.8
90.00	28.00	1250.0	10.00	317.8
90.00	28.00	1300.0	10.00	316.7
90.00	28.00	1350.0	10.00	314.6
90.00	28.00	1400.0	10.00	311.5
90.00	28.00	1450.0	10.00	307.4
90.00	28.00	1500.0	10.00	302.2
90.00	28.00	1550.0	10.00	295.9
90.00	28.00	1600.0	10.00	288.7
90.00	28.00	1650.0	10.00	280.3
90.00	28.00	1700.0	10.00	271.0
90.00	28.00	1750.0	10.00	260.5
90.00	28.00	1800.0	10.00	249.0
90.00	28.00	1850.0	10.00	236.4
90.00	28.00	1900.0	10.00	222.8
90.00	28.00	1950.0	10.00	208.1
90.00	28.00	2000.0	10.00	192.3

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H (cm)	U (%)	z (cm)
90.00	25.60	200.0	15.60	95.2
90.00	25.60	250.0	15.60	115.1
90.00	25.60	300.0	15.60	133.5
90.00	25.60	350.0	15.60	150.4
90.00	25.60	400.0	15.60	165.7
90.00	25.60	450.0	15.60	179.6
90.00	25.60	500.0	15.60	192.0
90.00	25.60	550.0	15.60	203.0
90.00	25.60	600.0	15.60	212.5
90.00	25.60	650.0	15.60	220.5
90.00	25.60	700.0	15.60	227.1
90.00	25.60	750.0	15.60	232.2
90.00	25.60	800.0	15.60	235.9
90.00	25.60	850.0	15.60	238.1
90.00	25.60	900.0	15.60	238.9
90.00	25.60	950.0	15.60	238.3
90.00	25.60	1000.0	15.60	236.2
90.00	25.60	1050.0	15.60	232.7
90.00	25.60	1100.0	15.60	227.7
90.00	25.60	1150.0	15.60	221.3
90.00	25.60	1200.0	15.60	213.4
90.00	25.60	1250.0	15.60	204.1
90.00	25.60	1300.0	15.60	193.3
90.00	25.60	1350.0	15.60	181.0
90.00	25.60	1400.0	15.60	167.3
90.00	25.60	1450.0	15.60	152.1
90.00	25.60	1500.0	15.60	135.4
90.00	25.60	1550.0	15.60	117.1
90.00	25.60	1600.0	15.60	97.4
90.00	25.60	1650.0	15.60	76.1
90.00	25.60	1700.0	15.60	53.3
90.00	25.60	1750.0	15.60	28.9
90.00	25.60	1800.0	15.60	2.9
90.00	25.60	1850.0	15.60	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H (cm)	U (%)	z (cm)
90.00	23.20	200.0	21.20	92.2
90.00	23.20	250.0	21.20	109.7
90.00	23.20	300.0	21.20	125.0
90.00	23.20	350.0	21.20	138.1
90.00	23.20	400.0	21.20	149.1
90.00	23.20	450.0	21.20	157.9
90.00	23.20	500.0	21.20	164.6
90.00	23.20	550.0	21.20	169.1
90.00	23.20	600.0	21.20	171.5
90.00	23.20	650.0	21.20	171.8
90.00	23.20	700.0	21.20	170.0
90.00	23.20	750.0	21.20	166.0
90.00	23.20	800.0	21.20	159.9
90.00	23.20	850.0	21.20	151.6
90.00	23.20	900.0	21.20	141.3
90.00	23.20	950.0	21.20	128.7
90.00	23.20	1000.0	21.20	114.0
90.00	23.20	1050.0	21.20	97.1
90.00	23.20	1100.0	21.20	78.0
90.00	23.20	1150.0	21.20	56.6
90.00	23.20	1200.0	21.20	33.1
90.00	23.20	1250.0	21.20	7.2
90.00	23.20	1300.0	21.20	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
90.00	20.80	200.0	26.80	86.3
90.00	20.80	250.0	26.80	98.9
90.00	20.80	300.0	26.80	107.9
90.00	20.80	350.0	26.80	113.4
90.00	20.80	400.0	26.80	115.3
90.00	20.80	450.0	26.80	113.8
90.00	20.80	500.0	26.80	108.7
90.00	20.80	550.0	26.80	100.1
90.00	20.80	600.0	26.80	87.9
90.00	20.80	650.0	26.80	72.2
90.00	20.80	700.0	26.80	52.8
90.00	20.80	750.0	26.80	29.9
90.00	20.80	800.0	26.80	3.3
90.00	20.80	850.0	26.80	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
90.00	18.40	200.0	32.40	68.2
90.00	18.40	250.0	32.40	65.8
90.00	18.40	300.0	32.40	55.6
90.00	18.40	350.0	32.40	37.6
90.00	18.40	400.0	32.40	11.8
90.00	18.40	450.0	32.40	0.0

ZONA SATURADA REQUERIDA (z) - Alargamento parcial

α (graus)	ϕ (graus)	H(cm)	U (%)	z(cm)
SE A UMIDADE INICIAL É A UMIDADE SATURADA, A RUPTURA OCORERÁ PARA QUALQUER ALTURA MAIOR OU IGUAL A ALTURA MÍNIMA INDEPENDENTEMENTE DA ZONA SATURADA				

 ALARGAMENTO LATERAL DE RAVINAS

ANEXO A.5

 ALARGAMENTO PARCIAL: LENCOL+FENDA NA PAR. DADOS FÍSICOS DO SOLO

Umidade inicial do solo	$U_0 = 10.00 \%$
Umidade do solo na saturação	$U_S = 38.00 \%$
Coesão do solo na umidade inicial	$C_0 = 8.50 \text{ t/m}^2$
Coesão do solo na saturação	$C_S = 0.50 \text{ t/m}^2$
Peso específico do solo seco	$\gamma_S = 1.40 \text{ t/m}^3$
Ângulo de atrito na umidade inicial	$\phi_0 = 28.00 \text{ graus}$
Ângulo de atrito na saturação	$\phi_S = 16.00 \text{ graus}$

ZONA SATURADA (z) e PROFUNDIDADE (h_f) e LOCALIZAÇÃO (B_2) DA FENDA

α (graus)	ϕ_s (graus)	U (%)	z (cm)	h_f (cm)	B_2 (cm)
75.00	16.00	10.00	63.4	169.1	62.3
75.00	16.00	15.60	61.3	163.5	60.2
75.00	16.00	21.20	59.3	158.2	58.3
75.00	16.00	26.80	57.4	153.2	56.4
75.00	16.00	32.40	55.7	148.5	54.7
75.00	16.00	38.00	54.0	144.2	53.1
90.00	16.00	10.00	0.0	86.2	0.0
90.00	16.00	10.00	26.8	69.3	20.2
90.00	16.00	10.00	53.7	52.5	40.4
90.00	16.00	10.00	80.5	35.7	60.7
90.00	16.00	10.00	107.3	18.9	80.9
90.00	16.00	10.00	134.1	2.0	101.1
90.00	16.00	15.60	0.0	82.0	0.0
90.00	16.00	15.60	24.8	67.2	18.7
90.00	16.00	15.60	49.6	52.4	37.4
90.00	16.00	15.60	74.4	37.6	56.1
90.00	16.00	15.60	99.2	22.8	74.8
90.00	16.00	15.60	124.0	8.0	93.5
90.00	16.00	21.20	0.0	78.2	0.0
90.00	16.00	21.20	23.2	65.0	17.5
90.00	16.00	21.20	46.4	51.8	35.0
90.00	16.00	21.20	69.7	38.6	52.5
90.00	16.00	21.20	92.9	25.3	70.0
90.00	16.00	21.20	116.1	12.1	87.5
90.00	16.00	26.80	0.0	74.8	0.0
90.00	16.00	26.80	21.9	62.8	16.5
90.00	16.00	26.80	43.9	50.9	33.1
90.00	16.00	26.80	65.8	38.9	49.6
90.00	16.00	26.80	87.8	27.0	66.1
90.00	16.00	26.80	109.7	15.1	82.7
90.00	16.00	26.80	131.6	3.1	99.2

ZONA SATURADA (z) e PROFUNDIDADE (h_f) e LOCALIZAÇÃO (B_2) DA FENDA

α (graus)	ϕ_s (graus)	U (%)	z (cm)	h_f (cm)	B_2 (cm)
90.00	16.00	32.40	0.0	71.6	0.0
90.00	16.00	32.40	20.9	60.7	15.7
90.00	16.00	32.40	41.8	49.8	31.5
90.00	16.00	32.40	62.6	38.9	47.2
90.00	16.00	32.40	83.5	28.1	62.9
90.00	16.00	32.40	104.4	17.2	78.7
90.00	16.00	32.40	125.3	6.3	94.4
90.00	16.00	38.00	0.0	68.7	0.0
90.00	16.00	38.00	20.0	58.7	15.1
90.00	16.00	38.00	40.0	48.7	30.1
90.00	16.00	38.00	60.0	38.7	45.2
90.00	16.00	38.00	80.0	28.7	60.3
90.00	16.00	38.00	100.0	18.7	75.4
90.00	16.00	38.00	120.0	8.7	90.4

ANEXO B: PROGRAMA COMPUTACIONAL

```

10 '-----
20 '----- PROGRAMA: ALARGAMENTO LATERAL DE RAVINAS -----
30 '          AUTOR: EDUARDO ENEAS DE FIGUEIREDO
40 '-----
50 '
60 ' DEFINE VARIAVEIS STRINGS
70 '
80 CLEAR:DEFSTR Z:KEY OFF
90 Z1=CHR$(12):Z2=CHR$(7):Z3="ALARGAMENTO LATERAL DE RAVINAS"
100 Z4=STRING$(70,"-"):Z5=STRING$(30,"-"):Z6="ALARGAMENTO TOTAL   INFILTRACAO"
110 Z7="ALARGAMENTO TOTAL   LENCOL E INFILTRACAO"
120 Z8="ALARGAMENTO PARCIAL   FENDA DE TRACAO NA SUPERF. LENCOL E INFILT."
130 Z9=CHR$(13):Z0=CHR$(32)
140 Z11="ALARGAMENTO PARCIAL   FENDA DE TRACAO NA PAREDE, LENCOL E INFILT."
150 Z12="ALARGAMENTO PARCIAL   FENDA DE TRACAO NA SUPERFICIE E INFILTRACAO"
160 '
170 ' DEFINE CONSTANTES
180 '
190 C=0:FC=3.1416/180:HMA=2000:HMB=1000
200 '
210 ' APRESENTA OPCOES
220 '
230 ' MUDA PAGINA E APRESENTA CABECARIO 1
240 '
250 GOSUB 6220
260 PRINT TAB(10)"          TIPO DO ALARGAMENTO          CAUSA (S) DO ALARGAMENTO":PRINT
TAB(10)Z4
270 PRINT TAB(10)"1 - ";Z6
280 PRINT TAB(10)"2 - ";Z7
290 PRINT TAB(10)"3 - ";Z8
300 PRINT TAB(10)"4 - ";Z11
310 PRINT TAB(10)"5 - ";Z12
320 PRINT TAB(10)Z4
330 PRINT TAB(10)"6 - FINALIZA"
340 PRINT TAB(10)Z4:PRINT:PRINT
350 PRINT TAB(10)"INDIQUE OPERACAO DESEJADA -> ";
360 Z=INPUT$(1):PRINT Z:IF Z("1" OR Z)"6" THEN PRINT Z2;:GOTO 360
370 GOSUB 7170
380 IF ZA=Z0 THEN GOTO 200
390 ON VAL(Z) GOTO 400, 1880, 3260, 3290, 4590, 7380
400 '
410 ' ALARGAMENTO LATERAL PELA INFILTRACAO
420 '
430 ' MUDA PAGINA E APRESENTA ENTRADA DE DADOS
440 '
450 GOSUB 6220
460 PRINT TAB(10)"ALARGAMENTO TOTAL PELA INFILTRACAO          ENTRADA DE DADOS
DO SOLO"
470 PRINT TAB(10)Z4
480 INPUT"          Capacidade de infiltracao maxima em mm/hora          'qo =" ;A1
490 INPUT"          Capacidade de infiltracao minima em mm/hora          'qf =" ;A2
500 INPUT"          Fator de amortecimento de Horton em (1/hora)          'k =" ;A3
510 INPUT"          Angulo da parede da ravina em graus          'i =" ;A4
520 INPUT"          Umidade inicial do solo em % do peso          'Uo =" ;A6
530 INPUT"          Umidade do solo na saturacao em % do peso          'Us =" ;A7

```



```

940 LPRINT TAB(30)Z5:LPRINT TAB(30)Z3:LPRINT TAB(30)Z5
950 LPRINT:LPRINT:LPRINT TAB(10)Z4
960 LPRINT TAB(10)"ALARGAMENTO TOTAL PELA INFILTRACAO          DADOS FISICOS DO
SOLO"
970 LPRINT TAB(10)Z4
980 LPRINT TAB(10)"Capacidade de infiltracao maxima          q = ";LPRINT
USING "##.##"; A1;: LPRINT " mm/h"
990 LPRINT
1000 LPRINT TAB(10)"Capacidade de infiltracao minima         q = ";LPRINT
USING "##.##"; A2;: LPRINT " mm/h"
1010 LPRINT
1020 LPRINT TAB(10)"Fator de amortecimento de Horton         k = ";LPRINT
USING "##.##"; A3;: LPRINT " h "
1030 LPRINT
1040 LPRINT TAB(10)"Umidade inicial do solo                  U = ";LPRINT
USING "##.##"; A6;: LPRINT " %"
1050 LPRINT
1060 LPRINT TAB(10)"Umidade do solo na saturacao             U = ";LPRINT
USING "##.##"; A7;: LPRINT " %"
1070 LPRINT
1080 LPRINT TAB(10)"Coeficiente de coesao do solo na          C = ";LPRINT
umidade inicial
USING "##.##"; A8;: LPRINT " t/m "
1090 LPRINT
1100 LPRINT TAB(10)"Coeficiente de coesao do solo na          C = ";LPRINT
saturacao
USING "##.##"; A9;: LPRINT " t/m "
1110 LPRINT
1120 LPRINT TAB(10)"Densidade dos graos                      G = ";LPRINT
USING "##.##"; A10
1130 LPRINT
1140 LPRINT TAB(10)"Indice de vazios do solo                  = ";LPRINT
USING "##.##"; A11
1150 LPRINT
1160 LPRINT TAB(10)"Peso especifico do solo seco              = ";LPRINT
USING "##.##"; A12;: LPRINT " t/m "
1170 LPRINT
1180 LPRINT TAB(10)"Angulo de atrito na umidade inicial      = ";LPRINT
USING "##.##"; A13;: LPRINT " graus"
1190 LPRINT
1200 LPRINT TAB(10)"Angulo de atrito na saturacao            = ";LPRINT
USING "##.##"; A14;: LPRINT " graus"
1210 LPRINT TAB(10)Z4:GOSUB 7170
1220 IF ZA=Z0 THEN 400
1230 GOTO 1590
1240 '
1250 ' IMPRESSAO NA TELA
1260 '
1270 GOSUB 6290
1280 FOR I=A4 TO 90 STEP 15
1290 FOR FI=10 TO 30 STEP 5
1300 FA=(1-COS((I-FI)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(FI*FC))
1310 FFI=(1-COS((I-A14)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(A14*FC))
1320 HMI=(A9/10)/(FFI*(1+A7/100)):HMI=(A9/10)/(FFI*(1+A7/100))
1330 HMI=100*INT(HMI/100+1)
1340 FOR H=HMI TO HMB STEP 50
1350 C1=H*FA

```

```

1360 C2=10*(A8-A9)/(A7-A6)
1370 UC=((A8/10+C2*A6/100-C1)/(C1+C2))*100
1380 GOSUB 6960
1390 FB=SIN((I-FI)*FC/2)/(SIN(I*FC)*SIN((I+FI)*FC/2))
1400 BC=H*FB
1410 IF I=90 GOTO 1430
1420 FD=TAN(I*FC)/TAN((1/2)*((I+FI)*FC)):GOTO 1440
1430 Q=(UC/100)*A10*H/(2*(1+A11)):GOTO 1450
1440 Q=(UC/100)*A10*H*(1-1/FD)/(2*(1+A11))
1450 T=10*Q/A2 - (A1-A2)/(A3*A2)
1460 GOSUB 7080
1470 PRINT TAB(13);:PRINT USING "##.##";I;:PRINT TAB(23);:PRINT USING
"##.##";FI;:PRINT TAB(32);:PRINT USING "####.##";H;:PRINT TAB(43);:PRINT USING
"##.##";UC;:PRINT TAB(52);:PRINT USING "####.##";BC;: GOTO 1480
1480 PRINT TAB(63);:PRINT USING "###.##";Q;:PRINT TAB(73);:PRINT USING
"####.##";B3:C=C+1
1490 IF I=90 AND H=HMB THEN C=0:PRINT TAB(10)Z4:PRINT TAB(10)"Altura Minima =
";:PRINT USING "####.##"; HMI;: PRINT " cm ":PRINT TAB(10)Z4:GOTO 1540
1500 IF H=HMB THEN C=0:PRINT TAB(10)Z4:PRINT TAB(10)"Altura Minima = ";:PRINT
USING "####.##"; HMI;:PRINT " cm ":PRINT TAB(10)Z4:GOSUB 6290:GOTO 1530:C=C+1
1510 NEXT H
1520 NEXT FI
1530 NEXT I
1540 GOSUB 7310
1550 GOTO 10
1560 '
1570 ' IMPRESSAO NO PAPEL
1580 '
1590 GOSUB 6370
1600 FOR I=A4 TO 90 STEP 15
1610 FOR FI=10 TO 30 STEP 5
1620 FA=(1-COS((I-FI)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(FI*FC))
1630 FF1=(1-COS((I-A14)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(A14*FC))
1640 HMI=(A9/10)/(FFI*(1+A7/100)):HMI=(A9/10)/(FFI*(1+A7/100))
1650 HMI=100*INT(HMI/100+1)
1660 FOR H=HMI TO HMA STEP 50
1670 C1=H*FA
1680 C2=10*(A8-A9)/(A7-A6)
1690 UC=((A8/10+C2*A6/100-C1)/(C1+C2))*100
1700 GOSUB 6960
1710 FB=SIN((I-FI)*FC/2)/(SIN(I*FC)*SIN((I+FI)*FC/2))
1720 BC=H*FB
1730 IF I=90 GOTO 1750
1740 FD=TAN(I*FC)/TAN((1/2)*((I+FI)*FC)):GOTO 1760
1750 Q=(UC/100)*A10*H/(2*(1+A11)):GOTO 1770
1760 Q=(UC/100)*A10*H*(1-1/FD)/(2*(1+A11))
1770 T=10*Q/A2 - (A1-A2)/(A3*A2)
1780 GOSUB 7080
1790 LPRINT TAB(13);:LPRINT USING "##.##";I;:LPRINT TAB(23);:LPRINT USING
"##.##";FI;:LPRINT TAB(32);:LPRINT USING "####.##";H;:LPRINT TAB(43);:LPRINT USING
"##.##";UC;:LPRINT TAB(52);:LPRINT USING "####.##";BC;:GOTO 1800
1800 LPRINT TAB(63);:LPRINT USING "###.##";Q;:LPRINT TAB(73);:LPRINT USING
"####.##";B3:C=C+1
1810 IF I=90 AND H=HMA THEN C=0:LPRINT TAB(10)Z4:LPRINT TAB(10)"Altura Minima =
";:LPRINT USING "####.##"; HMI;: LPRINT " cm ":LPRINT TAB(10)Z4:GOTO 1860

```

```

1820 IF H=HMA THEN C=0:LPRINT TAB(10)Z4:LPRINT TAB(10)"Altura Minima = ";LPRINT
USING "###.##"; HMI;:LPRINT " cm ":LPRINT TAB(10)Z4:GOSUB 6370:GOTO 1850:C=C+1
1830 NEXT H
1840 NEXT FI
1850 NEXT I
1860 GOSUB 7310
1870 GOTO 10
1880 '
1890 ' ALARGAMENTO PELO LENCOL: SISTEMA TOTAL (Z=2); SISTEMA PARCIAL (Z=3)
1900 '
1910 ' MUDA PAGINA E APRESENTA ENTRADA DE DADOS
1920 '
1930 GOSUB 6220
1940 IF VAL(Z)=3 THEN 1960 ELSE 1950
1950 PRINT TAB(10)"ALARGAMENTO TOTAL PELO LENCOL          DADOS FISICOS DO
SOLO":GOTO 1970
1960 PRINT TAB(10)"ALARGAMENTO PARCIAL:LENCOL+FENDA NA SUP. DADOS FISICOS DO
SOLO"
1970 PRINT TAB(10)Z4
1980 INPUT"          Angulo da parede da ravina em graus          ' i =";A4
1990 INPUT"          Umidade inicial do solo em % do peso          'Uo =";A6
2000 INPUT"          Umidade do solo na saturacao em % do peso          'Us =";A7
2010 INPUT"          Coesao do solo na umidade inicial em ton/m2          'Co =";A8
2020 INPUT"          Coesao do solo na saturacao em ton/m2          'Cs =";A9
2030 INPUT"          Peso especifico do solo seco em ton/m3          'Ps
=";A12
2040 INPUT"          Angulo de atrito na umidade inicial em graus          'Fo
=";A13
2050 INPUT"          Angulo de atrito na saturacao em graus          'Fs
=";A14
2060 PRINT TAB(10)Z4:GOSUB 7170
2070 IF ZA=Z0 THEN GOTO 1880
2080 '
2090 ' IMPRESSAO NA TELA OU NO PAPEL
2100 '
2110 GOSUB 7240
2120 IF ZA=Z9 THEN 2130 ELSE 2350
2130 '
2140 ' IMPRESSAO NA TELA
2150 '
2160 GOSUB 6220
2170 IF VAL(Z)=3 THEN 2190 ELSE 2180
2180 PRINT TAB(10)"ALARGAMENTO TOTAL PELO LENCOL          DADOS FISICOS DO
SOLO":GOTO 2200
2190 PRINT TAB(10)"ALARGAMENTO PARCIAL:LENCOL+FENDA NA SUP. DADOS FISICOS DO
SOLO":GOTO 2200
2200 PRINT TAB(10)Z4
2210 PRINT TAB(10)"Angulo da parede da ravina          i = ";:PRINT
USING "##.##"; A4;: PRINT " graus"
2220 PRINT TAB(10)"Umidade inicial do solo          Uo = ";:PRINT
USING "##.##"; A6;: PRINT " %"
2230 PRINT TAB(10)"Umidade do solo na saturacao          Us = ";:PRINT
USING "##.##"; A7;: PRINT " %"
2240 PRINT TAB(10)"Coesao do solo na umidade inicial          Co = ";:PRINT
USING "##.##"; A8;: PRINT " t/m2"

```



```

2250 PRINT TAB(10)"Coesaõ do solo na saturacao          Cs = ";:PRINT
USING "##.##"; A9;: PRINT " t/m2"
2260 PRINT TAB(10)"Peso especifico do solo seco          Ps = ";:PRINT
USING "##.##"; A12;: PRINT " t/m3"
2270 PRINT TAB(10)"Angulo de atrito na umidade inicial  Fo = ";:PRINT
USING "##.##"; A13;: PRINT " graus"
2280 PRINT TAB(10)"Angulo de atrito na saturacao        Fs = ";:PRINT
USING "##.##"; A14;: PRINT " graus"
2290 PRINT TAB(10)Z4:GOSUB 7170
2300 IF ZA=Z0 THEN GOTO 1880
2310 GOTO 2590
2320 '
2330 ' IMPRESSAO NO PAPEL
2340 '
2350
LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRI
NT:LPRINT:LPRINT:LPRINT
2360 LPRINT TAB(30)Z5:LPRINT TAB(30)Z3:LPRINT TAB(30)Z5
2370 LPRINT:LPRINT:LPRINT TAB(10)Z4
2380 IF VAL(Z)=2 THEN 2400 ELSE 2390
2390 LPRINT TAB(10)"ALARGAMENTO PARCIAL:LENCOL+FENDA NA SUP. DADOS FISICOS DO
SOLO":GOTO 2410
2400 LPRINT TAB(10)"ALARGAMENTO TOTAL PELO LENCOL          DADOS FISICOS DO
SOLO"
2410 LPRINT TAB(10)Z4
2420 LPRINT TAB(10)"Umidade inicial do solo              U = ";:LPRINT
USING "##.##"; A6;: LPRINT " %"
2430 LPRINT
2440 LPRINT TAB(10)"Umidade do solo na saturacao         U = ";:LPRINT
USING "##.##"; A7;: LPRINT " %"
2450 LPRINT
2460 LPRINT TAB(10)"Coesaõ do solo na umidade inicial  C = ";:LPRINT
USING "##.##"; A8;: LPRINT " t/m "
2470 LPRINT
2480 LPRINT TAB(10)"Coesaõ do solo na saturacao         C = ";:LPRINT
USING "##.##"; A9;: LPRINT " t/m "
2490 LPRINT
2500 LPRINT TAB(10)"Peso especifico do solo seco        = ";:LPRINT
USING "##.##"; A12;: LPRINT " t/m "
2510 LPRINT
2520 LPRINT TAB(10)"Angulo de atrito na umidade inicial  = ";:LPRINT
USING "##.##"; A13;: LPRINT " graus"
2530 LPRINT
2540 LPRINT TAB(10)"Angulo de atrito na saturacao        = ";:LPRINT
USING "##.##"; A14;: LPRINT " graus"
2550 LPRINT TAB(10)Z4:GOSUB 7170
2560 IF ZA=Z0 THEN 1880
2570 GOTO 2950
2580 '
2590 ' IMPRESSAO NA TELA
2600 '
2610 GOSUB 6460
2620 FOR I=A4 TO 90 STEP 15
2630 FOR U=A6 TO A7 STEP 5.6
2640 FI=A13-((A13-A14)*100/(A7-A6))+(100-A6/100)

```

```

2650 FA=(1-COS((I-FI)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(FI*FC))
2660 HMI=(A9/10)/(FA*(1+A7/100))
2670 HMI=100*INT(HMI/100+1)
2680 FOR H=HMI TO HMB STEP 50
2690 IF I=90 THEN H1=(1/2)*H:GOTO 2710
2700 H1=H*(1-SQR(TAN((1/2)*((I+FI)*FC))/TAN(I*FC)))
2710 A=(A7/100-U/100)*FA
2720 B=(A8/10-A9/10)-10*(U/100-A6/100)*(A8-A9)/(A7-A6)
2730 IF VAL(Z) = 2 GOTO 2750
2740 C = -H1^2*.5*A12*(1+U/100)*COS((1/2)*((I+FI)*FC))*SIN((1/2)*((I-
FI)*FC))/(1000*COS(FI*FC))-(A8/10-10*(U/100-A6/100)*(A8-A9)/(A7-A6))*(H-
H1)+FA*(1+U/100)*H^2:GOTO 2760
2750 C = FA*H^2*(1+U/100)-(A8/10-10*(U/100-A6/100)*(A8-A9)/(A7-A6))*H
2760 IF U=A7 GOTO 2810
2770 D=B^2-4*A*C
2780 E=(D)^.5-B/(2*A)
2790 IF E<=0 THEN E=0
2800 PRINT TAB(14);:PRINT USING "##.##";I;:PRINT TAB(28);:PRINT USING
"##.##";FI;:PRINT TAB(41);:PRINT USING "####.##";H;:PRINT TAB(56);:PRINT USING
"##.##";U;:PRINT TAB(69);:PRINT USING "####.##";E;:GOTO 2840:C=C+1
2810 PRINT "          SE A UMIDADE INICIAL E A UMIDADE SATURADA,A RUPTURA OCORERA
PARA QUAL-      QUER ALTURA MAIOR OU IGUAL A ALTURA MINIMA INDEPENDENTEMENTE
DA ZONA        SATURADA":PRINT TAB(10)Z4
2820 IF I=90 GOTO 2900
2830 GOSUB 6460:GOTO 2890
2840 IF E<=0 THEN C=0:PRINT TAB(10)Z4:GOSUB 6460:GOTO 2880:C=C+1
2850 IF I=90 AND U=A7 AND H=HMB THEN C=0:PRINT TAB(10)Z4:GOTO 2900
2860 IF H=HMB THEN C=0:PRINT TAB(10)Z4:GOSUB 6460:C=C+1
2870 NEXT H
2880 NEXT U
2890 NEXT I
2900 GOSUB 7310
2910 GOTO 10
2920 '
2930 ' IMPRESSAO NO PAPEL
2940 '
2950 GOSUB 6540
2960 FOR I=A4 TO 90 STEP 15
2970 FOR U=A6 TO A7 STEP 5.6
2980 FI=A13-((A13-A14)*100/(A7-A6))*(U/100-A6/100)
2990 FA=(1-COS((I-FI)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(FI*FC))
3000 HMI=(A9/10)/(FA*(1+A7/100))
3010 HMI=100*INT(HMI/100+1)
3020 FOR H=HMI TO HMA STEP 50
3030 IF I=90 THEN H1=(1/2)*H:GOTO 3050
3040 H1=H*(1-SQR(TAN((1/2)*((I+FI)*FC))/TAN(I*FC)))
3050 A=(A7/100-U/100)*FA
3060 B=(A8/10-A9/10)-10*(U/100-A6/100)*(A8-A9)/(A7-A6)
3070 IF VAL(Z) = 2 GOTO 3090
3080 C = -H1^2*.5*A12*(1+U/100)*COS((1/2)*((I+FI)*FC))*SIN((1/2)*((I-
FI)*FC))/(1000*COS(FI*FC))-(A8/10-10*(U/100-A6/100)*(A8-A9)/(A7-A6))*(H-
H1)+FA*(1+U/100)*H^2:GOTO 3100
3090 C = FA*H^2*(1+U/100)-(A8/10-10*(U/100-A6/100)*(A8-A9)/(A7-A6))*H
3100 IF U=A7 GOTO 3150
3110 D=B^2-4*A*C

```

```

3120 E=((D)^.5-8)/(2*A)
3130 IF E<=0 THEN E=0
3140 LPRINT TAB(14);:LPRINT USING "##.##";I;:LPRINT TAB(28);:LPRINT USING
"##.##";FI;:LPRINT TAB(41);:LPRINT USING "####.#";H;:LPRINT TAB(56);:LPRINT USING
"##.##";U;:LPRINT TAB(69);:LPRINT USING "#####.#";E;GOTO 3180:C=C+1
3150 LPRINT "          SE A UMIDADE INICIAL E A UMIDADE SATURADA,A RUPTURA OCORERA
PARA QUAL-          QUER ALTURA MAIOR OU IGUAL A ALTURA MINIMA INDEPENDENTEMENTE
DA ZONA          SATURADA":LPRINT TAB(10)Z4
3160 IF I=90 GOTO 3240
3170 GOSUB 6540:GOTO 3230
3180 IF E<=0 THEN C=0:LPRINT TAB(10)Z4:GOSUB 6540:GOTO 3220:C=C+1
3190 IF I=90 AND U=A7 AND H=HMA THEN C=0:LPRINT TAB(10)Z4:GOTO 3240
3200 IF H=HMA THEN C=0:LPRINT TAB(10)Z4:GOSUB 6540:C=C+1
3210 NEXT H
3220 NEXT U
3230 NEXT I
3240 GOSUB 7310
3250 GOTO 10
3260 '
3270 ' ALARGAMENTO PARCIAL PELO LENCOL - FENDA NA SUPERFICIE (Z=3)
3280 GOTO 1930
3290 '
3300 ' ALARGAMENTO PARCIAL - FENDA DE TRACAO NA PAREDE
3310 '
3320 ' MUDA PAGINA E APRESENTA CABECARIO
3330 '
3340 GOSUB 6220
3350 PRINT TAB(10) "ALARGAMENTO PARCIAL:LENCOL + FENDA NA PAR.  ENTRADA DE DADOS
DO SOLO"
3360 PRINT TAB(10)Z4
3370 INPUT"          Angulo da parede da ravina em graus          ' i =" ;A4
3380 INPUT"          Umidade inicial do solo em % do peso          'Uo =" ;A6
3390 INPUT"          Umidade do solo na saturacao em % do peso          'Us =" ;A7
3400 INPUT"          Coesao do solo na umidade inicial em ton/m2          'Co =" ;A8
3410 INPUT"          Coesao do solo na saturacao em ton/m2          'Cs =" ;A9
3420 INPUT"          Peso especifico do solo seco em ton/m3          'Ps
=" ;A12
3430 INPUT"          Angulo de atrito na umidade inicial em graus          'Fo
=" ;A13
3440 INPUT"          Angulo de atrito na saturacao em graus          'Fs
=" ;A14
3450 PRINT TAB(10)Z4:GOSUB 7170
3460 IF ZA=Z0 THEN GOTO 3290
3470 '
3480 ' IMPRESSAO NA TELA OU NO PAPEL
3490 '
3500 GOSUB 7240
3510 IF ZA=Z9 THEN 3520 ELSE 3720
3520 '
3530 ' IMPRESSAO NA TELA
3540 '
3550 GOSUB 6220
3560 PRINT TAB(10) "ALARGAMENTO PARCIAL:LENCOL+FENDA NA PAR.  DADOS FISICOS DO
SOLO"
3570 PRINT TAB(10)Z4

```

```

3580 PRINT TAB(10)"Angulo da parede da ravina          i = ";:PRINT
USING "##.##"; A4;: PRINT " graus"
3590 PRINT TAB(10)"Umidade inicial do solo             Uo = ";:PRINT
USING "##.##"; A6;: PRINT " %"
3600 PRINT TAB(10)"Umidade do solo na saturacao        Us = ";:PRINT
USING "##.##"; A7;: PRINT " %"
3610 PRINT TAB(10)"Coeficiente de coesao do solo na    Co = ";:PRINT
USING "##.##"; A8;: PRINT " t/m2"
3620 PRINT TAB(10)"Coeficiente de coesao do solo na    Cs = ";:PRINT
USING "##.##"; A9;: PRINT " t/m2"
3630 PRINT TAB(10)"Peso especifico do solo seco        Ps = ";:PRINT
USING "##.##"; A12;: PRINT " t/m3"
3640 PRINT TAB(10)"Angulo de atrito na umidade inicial Fo = ";:PRINT
USING "##.##"; A13;: PRINT " graus"
3650 PRINT TAB(10)"Angulo de atrito na saturacao       Fs = ";:PRINT
USING "##.##"; A14;: PRINT " graus"
3660 PRINT TAB(10)Z4:GOSUB 7170
3670 IF ZA=Z0 THEN GOTO 3290
3680 GOTO 3940
3690 '
3700 ' IMPRESSAO NO PAPEL
3710 '
3720
LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRI
NT:LPRINT:LPRINT:LPRINT
3730 LPRINT TAB(30)Z5:LPRINT TAB(30)Z3:LPRINT TAB(30)Z5
3740 LPRINT:LPRINT:LPRINT TAB(10)Z4
3750 LPRINT TAB(10)"ALARGAMENTO PARCIAL:LENCOL+FENDA NA PAR. DADOS FISICOS DO
SOLO"
3760 LPRINT TAB(10)Z4
3770 LPRINT TAB(10)"Umidade inicial do solo             U = ";:LPRINT
USING "##.##"; A6;: LPRINT " %"
3780 LPRINT
3790 LPRINT TAB(10)"Umidade do solo na saturacao        U = ";:LPRINT
USING "##.##"; A7;: LPRINT " %"
3800 LPRINT
3810 LPRINT TAB(10)"Coeficiente de coesao do solo na    C = ";:LPRINT
USING "##.##"; A8;: LPRINT " t/m "
3820 LPRINT
3830 LPRINT TAB(10)"Coeficiente de coesao do solo na    C = ";:LPRINT
USING "##.##"; A9;: LPRINT " t/m "
3840 LPRINT
3850 LPRINT TAB(10)"Peso especifico do solo seco        = ";:LPRINT
USING "##.##"; A12;: LPRINT " t/m "
3860 LPRINT
3870 LPRINT TAB(10)"Angulo de atrito na umidade inicial = ";:LPRINT
USING "##.##"; A13;: LPRINT " graus"
3880 LPRINT
3890 LPRINT TAB(10)"Angulo de atrito na saturacao       = ";:LPRINT
USING "##.##"; A14;: LPRINT " graus"
3900 LPRINT TAB(10)Z4:GOSUB 7170
3910 IF ZA=Z0 THEN 3290
3920 GOTO 4290
3930 '
3940 ' IMPRESSAO NA TELA

```

```

3950 '
3960 GOSUB 6630
3970 FOR I=A4 TO 90 STEP 5
3980 FOR U=A6 TO A7 STEP 5.6
3990 FI=A14
4000 FA=(1-COS((I-FI)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(FI*FC))
4010 IF I=90 GOTO 4120
4020 A=TAN(I*FC)/TAN((1/2)*((I+FI)*FC))
4030 E=(A9/10)/(FA*((1+A7/100)+(1+U/100)*(A-1)))
4040 H1=E*(A-1)
4050 X2=E/TAN((1/2)*((I+FI)*FC))
4060 PRINT TAB(12);:PRINT USING "##.##";I;:PRINT TAB(26);:PRINT USING
"##.##";FI;:PRINT TAB(38);:PRINT USING "##.##";U;:PRINT TAB(48);:PRINT USING
"#####.##";E;:GOTO 4070
4070 PRINT TAB(60);:PRINT USING "#####.##";H1;:PRINT TAB(72);:PRINT USING
"#####.##";X2:C=C+1
4080 IF U=A7 THEN PRINT TAB(10)Z4
4090 IF I=90 AND U=A7 THEN C=0:GOTO 4240
4100 IF I=A4+20 AND U=A7 THEN C=0:GOSUB 6630:C=C+1
4110 GOTO 4220
4120 HMI=A9/(10*FA*2*(1+U/100))
4130 HMA=A9/(10*FA*(1+A7/100))
4140 FOR H=HMI TO HMA STEP 10
4150 E=(H*2*(1+U/100)-HMA*(1+A7/100))/(2*(1+U/100)-(1+A7/100))
4160 H1=H-E:X2=E/TAN((1/2)*((I+FI)*FC))
4170 PRINT TAB(12);:PRINT USING "##.##";I;:PRINT TAB(26);:PRINT USING
"##.##";FI;:PRINT TAB(38);:PRINT USING "##.##";U;:PRINT TAB(48);:PRINT USING
"#####.##";E;:GOTO 4180
4180 PRINT TAB(60);:PRINT USING "#####.##";H1;:PRINT TAB(72);:PRINT USING
"#####.##";X2:C=C+1
4190 IF C=32 THEN C=0:PRINT TAB(10)Z4:GOSUB 6630:C=C+1
4200 NEXT H
4210 PRINT TAB(10)Z4
4220 NEXT U
4230 NEXT I
4240 GOSUB 7310
4250 GOTO 10
4260 '
4270 ' IMPRESSAO NO PAPEL
4280 '
4290 GOSUB 6710
4300 FOR I=A4 TO 90 STEP 15
4310 FOR U=A6 TO A7 STEP 5.6
4320 FI=A14
4330 FA=(1-COS((I-FI)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(FI*FC))
4340 IF I=90 GOTO 4450
4350 A=TAN(I*FC)/TAN((1/2)*((I+FI)*FC))
4360 E=(A9/10)/(FA*((1+A7/100)+(1+U/100)*(A-1)))
4370 H1=E*(A-1)
4380 X2=E/TAN((1/2)*((I+FI)*FC))
4390 LPRINT TAB(12);:LPRINT USING "##.##";I;:LPRINT TAB(26);:LPRINT USING
"##.##";FI;:LPRINT TAB(38);:LPRINT USING "##.##";U;:LPRINT TAB(48);:LPRINT USING
"#####.##";E;:GOTO 4400
4400 LPRINT TAB(60);:LPRINT USING "#####.##";H1;:LPRINT TAB(72);:LPRINT USING
"#####.##";X2:C=C+1

```

```

4410 IF U=A7 THEN LPRINT TAB(10)Z4
4420 IF I=90 AND U=A7 THEN C=0:GOTO 4570
4430 IF I=A4+15 AND U=A7 THEN C=0:GOSUB 6710:C=C+1
4440 GOTO 4550
4450 HMI=A9/(10*FA*2*(1+U/100))
4460 HMA=A9/(10*FA*(1+A7/100))
4470 FOR H=HMI TO HMA STEP 10
4480 E=(H*2*(1+U/100)-HMA*(1+A7/100))/(2*(1+U/100)-(1+A7/100))
4490 H1=H-E:X2=E/TAN((1/2)*((I+FI)*FC))
4500 LPRINT TAB(12);:LPRINT USING "##.##";I;:LPRINT TAB(26);:LPRINT USING
"##.##";F1;:LPRINT TAB(38);:LPRINT USING "##.##";U;:LPRINT TAB(48);:LPRINT USING
"#####.##";E;:GOTO 4510
4510 LPRINT TAB(60);:LPRINT USING "#####.##";H1;:LPRINT TAB(71);:LPRINT USING
"#####.##";X2:C=C+1
4520 IF C=32 THEN C=0:LPRINT TAB(10)Z4:GOSUB 6710:C=C+1
4530 NEXT H
4540 LPRINT TAB(10)Z4
4550 NEXT U
4560 NEXT I
4570 GOSUB 7310
4580 GOTO 10
4590 '
4600 ' ALARGAMENTO PARCIAL PELA INFILTRACAO - FENDA DE TRACAO NA SUPERFICIE
4610 '
4620 ' MUDA PAGINA E APRESENTA ENTRADA DE DADOS
4630 '
4640 GOSUB 6220
4650 PRINT TAB(10) "ALARGAMENTO PARCIAL:INFILT.+FENDA NA SUP.   ENTRADA DE DADOS
DO SOLO"
4660 PRINT TAB(10)Z4
4670 INPUT"      Capacidade de infiltracao maxima em mm/hora           'qo =" ;A1
4680 INPUT"      Capacidade de infiltracao minima em mm/hora          'qf =" ;A2
4690 INPUT"      Fator de amortecimento de Horton em (1/hora)         'k  =" ;A3
4700 INPUT"      Angulo da parede da ravina em graus                   'i  =" ;A4
4710 INPUT"      Umidade inicial do solo em % do peso                  'Uo =" ;A6
4720 INPUT"      Umidade do solo na saturacao em % do peso            'Us =" ;A7
4730 INPUT"      Coesao do solo na umidade inicial em ton/m2          'Co =" ;A8
4740 INPUT"      Coesao do solo na saturacao em ton/m2                 'Cs =" ;A9
4750 INPUT"      Densidade dos graos                                    'G
=" ;A10
4760 INPUT"      Indice de vazios do solo                               'e
=" ;A11
4770 INPUT"      Peso especifico do solo seco em ton/m3                'Ps
=" ;A12
4780 INPUT"      Angulo de atrito na umidade inicial em graus         'Fo
=" ;A13
4790 INPUT"      Angulo de atrito na saturacao em graus                'Fs
=" ;A14
4800 PRINT TAB(10)Z4:GOSUB 7170
4810 IF ZA=Z0 THEN GOTO 4590
4820 '
4830 ' IMPRESSAO NA TELA OU NO PAPEL
4840 '
4850 GOSUB 7240
4860 IF ZA=Z9 THEN 4870 ELSE 5090

```

```

4870 '
4880 ' IMPRESSAO NA TELA
4890 '
4900 GOSUB 6220
4910 PRINT TAB(10)"ALARGAMENTO PARCIAL:INFILT.+FENDA NA SUP. DADOS FISICOS DO
SOLO"
4920 PRINT TAB(10)Z4
4930 PRINT TAB(10)"Capacidade de infiltracao maxima          qo = " ;:PRINT
USING "##.##"; A1;: PRINT " mm/h"
4940 PRINT TAB(10)"Capacidade de infiltracao minima          qf = " ;:PRINT
USING "##.##"; A2;: PRINT " mm/h"
4950 PRINT TAB(10)"Fator de amortecimento de Horton          k = " ;:PRINT
USING "##.##"; A3;: PRINT " 1/h"
4960 PRINT TAB(10)"Angulo da parede da ravina                i = " ;:PRINT
USING "##.##"; A4;: PRINT " graus"
4970 PRINT TAB(10)"Umidade inicial do solo                    Uo = " ;:PRINT
USING "##.##"; A6;: PRINT " %"
4980 PRINT TAB(10)"Umidade do solo na saturacao              Us = " ;:PRINT
USING "##.##"; A7;: PRINT " %"
4990 PRINT TAB(10)"Coesao do solo na umidade inicial          Co = " ;:PRINT
USING "##.##"; A8;: PRINT " t/m2"
5000 PRINT TAB(10)"Coesao do solo na saturacao              Cs = " ;:PRINT
USING "##.##"; A9;: PRINT " t/m2"
5010 PRINT TAB(10)"Densidade dos graos                        G = " ;:PRINT
USING "##.##"; A10
5020 PRINT TAB(10)"Indice de vazios do solo                    e = " ;:PRINT
USING "##.##"; A11
5030 PRINT TAB(10)"Peso especifico do solo seco                Ps = " ;:PRINT
USING "##.##"; A12;: PRINT " t/m3"
5040 PRINT TAB(10)"Angulo de atrito na umidade inicial        Fo = " ;:PRINT
USING "##.##"; A13;: PRINT " graus"
5050 PRINT TAB(10)"Angulo de atrito na saturacao              Fs = " ;:PRINT
USING "##.##"; A14;: PRINT " graus"
5060 PRINT TAB(10)Z4;GOSUB 7170
5070 IF ZA=Z0 THEN GOTO 4590
5080 GOTO 5430
5090 '
5100 ' IMPRESSAO NO PAPEL
5110 '
5120
LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT
5130 LPRINT TAB(30)Z5:LPRINT TAB(30)Z3:LPRINT TAB(30)Z5
5140 LPRINT:LPRINT:LPRINT TAB(10)Z4
5150 LPRINT TAB(10)"ALARGAMENTO PARCIAL:INFILT.+FENDA NA SUP. DADOS FISICOS DO
SOLO"
5160 LPRINT TAB(10)Z4
5170 LPRINT TAB(10)"Capacidade de infiltracao maxima          q = " ;:LPRINT
USING "##.##"; A1;: LPRINT " mm/h"
5180 LPRINT
5190 LPRINT TAB(10)"Capacidade de infiltracao minima          q = " ;:LPRINT
USING "##.##"; A2;: LPRINT " mm/h"
5200 LPRINT
5210 LPRINT TAB(10)"Fator de amortecimento de Horton          k = " ;:LPRINT
USING "##.##"; A3;: LPRINT " h "
5220 LPRINT

```

```

5230 LPRINT TAB(10)"Umidade inicial do solo          U = ";:LPRINT
USING "##.##"; A6;: LPRINT " %"
5240 LPRINT
5250 LPRINT TAB(10)"Umidade do solo na saturacao    U = ";:LPRINT
USING "##.##"; A7;: LPRINT " %"
5260 LPRINT
5270 LPRINT TAB(10)"Coesao do solo na umidade inicial C = ";:LPRINT
USING "##.##"; A8;: LPRINT " t/m "
5280 LPRINT
5290 LPRINT TAB(10)"Coesao do solo na saturacao    C = ";:LPRINT
USING "##.##"; A9;: LPRINT " t/m "
5300 LPRINT
5310 LPRINT TAB(10)"Densidade dos graos            G = ";:LPRINT
USING "##.##"; A10
5320 LPRINT
5330 LPRINT TAB(10)"Indice de vazios do solo        = ";:LPRINT
USING "##.##"; A11
5340 LPRINT
5350 LPRINT TAB(10)"Peso especifico do solo seco    = ";:LPRINT
USING "##.##"; A12;: LPRINT " t/m "
5360 LPRINT
5370 LPRINT TAB(10)"Angulo de atrito na umidade inicial = ";:LPRINT
USING "##.##"; A13;: LPRINT " graus"
5380 LPRINT
5390 LPRINT TAB(10)"Angulo de atrito na saturacao   = ";:LPRINT
USING "##.##"; A14;: LPRINT " graus"
5400 LPRINT TAB(10)Z4:GOSUB 7170
5410 IF ZA=Z0 THEN 4590
5420 GOTO 5750
5430 '
5440 ' IMPRESSAO NA TELA
5450 '
5460 GOSUB 6800
5470 FOR I=A4 TO 90 STEP 15
5480 FOR F1=10 TO 30 STEP 5
5490 FA=(1-COS((I-F1)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(F1*FC))
5500 FFI=(1-COS((I-A14)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(A14*FC))
5510 HMI=(A9/10)/(FFI*(1+A7/100))
5520 HMI=100*INT(HMI/100+1)
5530 FOR H=HMI TO HMB STEP 50
5540 IF I=90 THEN H1=(1/2)*H:GOTO 5570
5550 A=TAN((1/2)*((I+F1)*FC))/TAN(I*FC)
5560 H1=H*(1-A^.5)
5570 C1=(H^2-H1^2*SIN(I*FC)*COS((1/2)*((I+F1)*FC))/SIN((1/2)*((I-
FI)*FC)))*(FA/(H-H1))
5580 C2=10*(A8-A9)/(A7-A6)
5590 UC=((A8/10+C2*A6/100-C1)/(C1+C2))*100
5600 GOSUB 6070
5610 BC=(H-H1)/TAN((1/2)*((1+F1)*FC))-H/TAN(I*FC)
5620 IF I=90 THEN Q=(UC/100)*A10*H/(2*(1+A11)):GOTO 5640
5630 Q=(UC/100)*A10*H*(1-A)/(2*(1+A11))
5640 T=10*Q/A2-(A1-A2)/(A3*A2)
5650 GOSUB 7080
5660 PRINT TAB(13);:PRINT USING "##.##";1;:PRINT TAB(23);:PRINT USING
"##.##";FI;:PRINT TAB(32);:PRINT USING "###.##";H;:PRINT TAB(43);:PRINT USING

```



```

"##.##";UC;:PRINT TAB(52);:PRINT USING "###.##";BC;: GOTO 5670
5670 PRINT TAB(63);:PRINT USING "###.##";Q;:PRINT TAB(73);:PRINT USING
"###.##";B3:C=C+1
5680 IF I=90 AND H=HMB THEN C=0:PRINT TAB(10)Z4:GOTO 5730
5690 IF H=HMB THEN C=0:PRINT TAB(10)Z4:GOSUB 6800:GOTO 5720:C=C+1
5700 NEXT H
5710 NEXT FI
5720 NEXT I
5730 GOSUB 7310
5740 GOTO 10
5750 '
5760 ' IMPRESSAO NO PAPEL
5770 '
5780 GOSUB 6870
5790 FOR I=A4 TO 90 STEP 15
5800 FOR FI=10 TO 30 STEP 5
5810 FA=(1-COS((I-FI)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(FI*FC))
5820 FFI=(1-COS((I-A14)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(A14*FC))
5830 HMI=(A9/10)/(FFI*(1+A7/100))
5840 HMI=100*INT(HMI/100+1)
5850 FOR H=HMI TO HMA STEP 50
5860 IF I=90 THEN H1=(1/2)*H:GOTO 5890
5870 A=TAN((1/2)*((I+FI)*FC))/TAN(I*FC)
5880 H1=H*(1-A^.5)
5890 C1=(H^2-H1^2*SIN(I*FC)*COS((1/2)*((I+FI)*FC)))/SIN((1/2)*((I-
FI)*FC))*(FA/(H-H1))
5900 C2=10*(A8-A9)/(A7-A6)
5910 UC=((A8/10+C2*A6/100-C1)/(C1+C2))*100
5920 GOSUB 6070
5930 BC=(H-H1)/TAN((1/2)*((I+FI)*FC))-H/TAN(I*FC)
5940 IF I=90 THEN Q=(UC/100)*A10*H/(2*(1+A11)):GOTO 5960
5950 Q=(UC/100)*A10*H*(1-A)/(2*(1+A11))
5960 T=10*Q/A2-(A1-A2)/(A3*A2)
5970 GOSUB 7000
5980 LPRINT TAB(13);:LPRINT USING "##.##";I;:LPRINT TAB(23);:LPRINT USING
"##.##";FI;:LPRINT TAB(32);:LPRINT USING "###.##";H;:LPRINT TAB(43);:LPRINT USING
"##.##";UC;:LPRINT TAB(52);:LPRINT USING "###.##";BC;: GOTO 5990
5990 LPRINT TAB(63);:LPRINT USING "###.##";Q;:LPRINT TAB(73);:LPRINT USING
"###.##";B3:C=C+1
6000 IF I=90 AND H=HMA THEN C=0:LPRINT TAB(10)Z4:GOTO 6050
6010 IF H=HMA THEN C=0:LPRINT TAB(10)Z4:GOSUB 6870:GOTO 6040:C=C+1
6020 NEXT H
6030 NEXT FI
6040 NEXT I
6050 GOSUB 7310
6060 GOTO 10
6070 '
6080 ' SUBROTINA CALCULO DO ANGULO DE ATRITO INTERNO - RUPTURA PARCIAL
6090 '
6100 A15=A13-((A13-A14)*100/(A7-A6))*(UC/100-A6/100)
6110 DELTA=.0001
6120 IF ABS(A15-FI)DELTA THEN 6130 ELSE 6210
6130 FI=A15
6140 FA=(1-COS((1-FI)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(FI*FC))
6150 IF I=90 THEN H1=(1/2)*H:GOTO 6180

```

```

6160 A=TAN((1/2)*((I+FI)*FC))/TAN(I*FC)
6170 H1=H*(1-A^.5)
6180 C1=(H^2-H1^2*SIN(I*FC)*COS((1/2)*((I+FI)*FC)))/SIN((1/2)*((I-
FI)*FC))*(FA/(H-H1))
6190 UC=((A8/10+C2*A6/100-C1)/(C1+C2))*100
6200 GOTO 6100
6210 RETURN
6220 '
6230 ' SUBROTINA CABECARIO 1
6240 '
6250 PRINT Z1
6260 PRINT TAB(30)Z5:PRINT TAB(30)Z3:PRINT TAB(30)Z5
6270 PRINT:PRINT TAB(10)Z4
6280 RETURN
6290 '
6300 ' SUBROTINA CABECARIO TABELA 1 - PRINT
6310 '
6320 PRINT Z1
6330 PRINT TAB(10)"CONDICOES CRITICAS DO ALARGAMENTO TOTAL POR RUPTURA":PRINT
TAB(10)Z4
6340 PRINT TAB(10)" i(graus) fi(graus) H(cm) Uc(%) B(cm) Q(cm)
t(horas)":C=C+1
6350 PRINT TAB(10)Z4
6360 RETURN
6370 '
6380 ' SUBROTINA CABECARIO TABELA 1 - LPRINT
6390 '
6400 LPRINT Z1
6410 LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT
6420 LPRINT TAB(10)"CONDICOES CRITICAS DO ALARGAMENTO TOTAL POR RUPTURA":LPRINT
TAB(10)Z4
6430 LPRINT TAB(10)" (graus) (graus) H(cm) U (%) B (cm) Q(cm)
t(horas)":C=C+1
6440 LPRINT TAB(10)Z4
6450 RETURN
6460 '
6470 ' SUBROTINA CABECARIO TABELA 2 - PRINT
6480 '
6490 PRINT Z1
6500 PRINT TAB(10)"ZONA SATURADA REQUERIDA (z)":PRINT TAB(10)Z4
6510 PRINT TAB(10)" i(graus) fi(graus) H(cm) U (%)
z(cm)":C=C+1
6520 PRINT TAB(10)Z4
6530 RETURN
6540 '
6550 ' SUBROTINA CABECARIO TABELA 2 - LPRINT
6560 '
6570 LPRINT Z1
6580 LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT
6590 LPRINT TAB(10)"ZONA SATURADA REQUERIDA (z)":LPRINT TAB(10)Z4
6600 LPRINT TAB(10)" (graus) (graus) H(cm) U (%)
z(cm)":C=C+1
6610 LPRINT TAB(10)Z4
6620 RETURN
6630 '

```

```

6640 ' SUBROTINA CABECARIO TABELA 3 - PRINT
6650 '
6660 PRINT Z1
6670 PRINT TAB(10)"ZONA SATURADA (z) e PROFUNDIDADE (h ) e LOCALIZACAO (B ) DA
FENDA":PRINT TAB(10)Z4
6680 PRINT TAB(10)"i(graus)      fi(graus)      U (%)      z(cm)      h (cm)
B (cm)":C=C+1
6690 PRINT TAB(10)Z4
6700 RETURN
6710 '
6720 ' SUBROTINA CABECARIO TABELA 3 - LPRINT
6730 '
6740 LPRINT Z1
6750 LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT
6760 LPRINT TAB(10)"ZONA SATURADA (z) e PROFUNDIDADE (h ) e LOCALIZACAO (B ) DA
FENDA":LPRINT TAB(10)Z4
6770 LPRINT TAB(10)" (graus)      (graus)      U (%)      z(cm)      h (cm)
B (cm)":C=C+1
6780 LPRINT TAB(10)Z4
6790 RETURN
6800 ' SUBROTINA CABECARIO TABELA 4 - PRINT
6810 '
6820 PRINT Z1
6830 PRINT TAB(10)"CONDICOES CRITICAS DO ALARGAMENTO PARCIAL POR RUPTURA":PRINT
TAB(10)Z4
6840 PRINT TAB(10)" i(graus) fi(graus) H(cm)      Uc(%)      B (cm)      Q(cm)
t(horas)":C=C+1
6850 PRINT TAB(10)Z4
6860 RETURN
6870 '
6880 ' SUBROTINA CABECARIO TABELA 4 - LPRINT
6890 '
6900 LPRINT Z1
6910 LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT
6920 LPRINT TAB(10)"CONDICOES CRITICAS DO ALARGAMENTO PARCIAL - FENDA NA
SUPERFICIE":LPRINT TAB(10)Z4
6930 LPRINT TAB(10)" (graus)      (graus)      H(cm)      U (%)      B (cm)      Q(cm)
t(horas)":C=C+1
6940 LPRINT TAB(10)Z4
6950 RETURN
6960 '
6970 ' SUBROTINA CALCULO DO ANGULO DE ATRITO INTERNO
6980 '
6990 A15=A13-((A13-A14)*100/(A7-A6))*(UC/100-A6/100)
7000 DELTA=.0001
7010 IF ABS(A15-F1)>DELTA THEN 7020 ELSE 7070
7020 F1=A15
7030 FA=(1-COS((I-F1)*FC))*(A12/1000)/(4*SIN(I*FC)*COS(F1*FC))
7040 C1=H*FA
7050 UC=((A8/10+C2*A6/100-C1)/(C1+C2))*100
7060 GOTO 6990
7070 RETURN
7080 '
7090 ' SUBROTINA CALCULO DO TEMPO DE RUPTURA - METODO DE NEWTON
7100 '

```

```
7110 B1=(1/A3)*(A2/10-A1/10)*EXP(-A3*T)+A2/10*T+((1/A3)*(A1/10-A2/10)-Q)
7120 B2=(A1/10-A2/10)*EXP(-A3*T)+A2/10
7130 B3=T-B1/B2
7140 DELTA=ABS(.0001*B3)
7150 IF ABS(B3-T)>DELTA THEN T=B3:GOTO 7110
7160 RETURN
7170 '
7180 ' SUBROTINA CONTINUA/CORRIGE
7190 '
7200 PRINT:PRINT
7210 PRINT TAB(10)"TECLE 'ENTER' P/CONTINUAR OU 'SPACE' P/CORRIGIR" ;
7220 ZA=INPUT$(1):IF ZA<>Z0 AND ZA<>Z9 THEN PRINT Z2;:GOTO 7220
7230 RETURN
7240 '
7250 'SUBROTINA IMPRESSAO NA TELA OU NO PAPEL
7260 '
7270 PRINT:PRINT
7280 PRINT TAB(10)"P/IMPRESSAO NA TELA OU NO PAPEL TECLE 'ENTER' OU 'SPACE'" ;
7290 ZA=INPUT$(1):IF ZA<>Z9 AND ZA<>Z0 THEN PRINT Z2;:GOTO 7290
7300 RETURN
7310 '
7320 ' SUBROTINA CONTINUA
7330 '
7340 PRINT:PRINT
7350 PRINT TAB(10)"TECLE 'ENTER' P/CONTINUAR" ;
7360 ZA=INPUT$(1):IF ZA<>Z9 THEN PRINT Z2;:GOTO 7360
7370 RETURN
7380 END
```