

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE PROTEÇÃO PARA TALUDES EM ESTRADA NÃO-PAVIMENTADA

Evaluation of methods for protection of slopes in unpaved roads

Danilo José Brandão Vitor Silva*

George de Paula Bernardes**

José Augusto de Lollo***

Sílvio Jorge Coelho Simões****

Isabel Cristina de Barros Trannin*****

RESUMO – Este trabalho apresenta a avaliação de três métodos de proteção de taludes de estradas rurais, contra o desenvolvimento de processos erosivos. Os métodos analisados foram: (1) plantio de grama “São Carlos” (*Axonopus compressus*); (2) serrapilheira, constituída por galhos e folhas de eucalipto *E. Grandis* e, (3) envelopamento com um solo local com características mais resistentes aos processos erosivos. O experimento consistiu da montagem de quatro células retangulares, sendo uma para cada método de proteção e uma mantida desprotegida para avaliação da eficiência dos tratamentos. A determinação da quantidade de sedimentos erodidos baseou-se no somatório dos sólidos em suspensão e nos sedimentos armazenados em bolsa de geotêxtil. O estudo da erodibilidade dos solos foi realizado através de ensaios de identificação em laboratório. Os resultados de campo, quando comparados à célula desprotegida, mostraram que a serrapilheira obteve uma redução da perda de solo de 90%, enquanto a grama e o envelopamento reduziram 80% e 65%, respectivamente.

SYNOPSIS – This work presents the evaluation of three protection methods of road slopes, against the development of erosion processes. The methods analyzed were: (1) planting "São Carlos" grass (*Axonopus compressus*), (2) litter, composed of branches and leaves of eucalyptus *E. Grandis*, and (3) compacted soil cover with a local soil more resistant to erosion processes. The experiment consisted of assembly of four rectangular cells, one for each method and one cell kept unprotected to evaluate the efficiency of the treatments. The determination of the amount of eroded sediment was based on the sum of solids in suspension and stored sediments in geotextile bags. The erodibility of the soils was evaluated by laboratory identification tests. The results showed that, compared to the unprotected cell, the litter obtained 90% reduction of soil loss, while grass and compacted soil cover reduced 80% and 65%, respectively.

PALAVRAS CHAVE – Erosão, erodibilidade, proteção de taludes.

1 – INTRODUÇÃO

As estradas são obras públicas de vital importância para o desenvolvimento, uma vez que se trata do principal meio de escoamento da produção agroindustrial e permitem o intercâmbio entre as

* Mestre em Engenharia Civil, doutorando da UNESP – Universidade Estadual Paulista, Brasil, *campus* de Guaratinguetá. E-mail: danilojbrandao@gmail.com.

** Professor Doutor, UNESP – Universidade Estadual Paulista, *campus* de Guaratinguetá, Brasil. E-mail: gpb@feg.unesp.br

*** Professor Titular, UNESP – Universidade Estadual Paulista, *campus* de Ilha Solteira, Brasil. E-mail: lolloja@dec.feis.unesp.br

**** Professor Livre Docente, UNESP – Universidade Estadual Paulista, *campus* de Guaratinguetá, Brasil. E-mail: simoes@feg.unesp.br

***** Professora Doutora, UNESP – Universidade Estadual Paulista, *campus* de Guaratinguetá, Brasil. E-mail: isatrannin@feg.unesp.br

comunidades rurais e urbanas (Dadalto *et al.*, 1990). O Brasil possui aproximadamente 1 725 000 km de estradas distribuídas por todos os Estados da Federação, das quais mais de 90% não são pavimentadas. Minas Gerais é o Estado que possui a maior malha viária, sendo que apenas 7% de toda essa extensão é pavimentada (DNER, 2008).

O principal problema ambiental acarretado pelas estradas é o desencadeamento e a potencialização dos processos erosivos decorrentes da retirada da cobertura vegetal, da movimentação do solo e da compactação inadequada de seu leito, tornando tais vias muito vulneráveis aos processos de erosão causada pela chuva (Correa, 2005). Geralmente as estradas não-pavimentadas resultam da evolução de trilhas ou caminhos pré-existentes e demandam serviços de movimentação de terra gerando taludes de corte e ou aterro que em grande parte das vezes são construídos sem qualquer conhecimento técnico, baseando-se somente na experiência popular. Em decorrência disto, essas obras lineares têm um grande impacto no meio físico.

Segundo o DER-SP (1991), uma das principais formas de processos erosivos que ocorre em estradas é a erosão em taludes. Isto ocorre de um modo geral por apresentarem superfícies mais frágeis devido, ora à exposição do solo, ora às deficiências comumente resultantes da construção. Estes aspectos associados geralmente à falta de proteção superficial e à inexistência ou ineficácia de sistema de drenagem podem desencadear processos erosivos (DER-SP, 1991). Da erosão que ocorre nas estradas, aproximadamente 75% são provenientes dos taludes de aterro e corte.

Uma importante medida para controle da erosão na superfície de taludes é a aplicação de coberturas que impeçam mecanicamente a perda de solo (Souza, 2000).

Este trabalho apresenta uma análise comparativa de três métodos de proteção de taludes de estradas rurais não-pavimentadas, empregando materiais de baixo custo. Os métodos de proteção investigados são de simples implementação e exigem pouca manutenção, dando assim, condições aos produtores rurais de manterem as estradas em condições de tráfego.

2 – DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região em estudo refere-se à fazenda Santa Edwirges, de propriedade da Fibria Celulose Ltda, leste do Estado de São Paulo, no Vale do Paraíba – Município de Lorena (Figura 1). Possui uma área de 12 km² e encontra-se próxima ao divisor de águas da serra Quebra Cangalha, onde estão localizadas as nascentes do ribeirão Tabão. Sua localização está entre as coordenadas 0485535 / 0497741 UTM e coordenadas 7480000 / 7466000 UTM.

2.1 – Caracterização geológica

A fazenda Santa Edwirges encontra-se totalmente inserida em um contexto geológico formado por rochas cristalinas de idade precambriana (> 500 milhões de anos). O mapa da Figura 2 apresenta

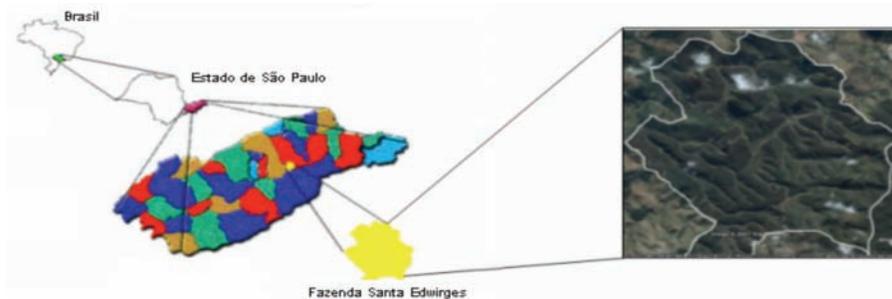


Fig. 1 – Localização da área de estudo.

as diferentes unidades geológicas encontradas na região: a) rochas metamórficas (xistos, gnaisses e migmatitos) do Complexo Embu (Hasui e Sadowski, 1976; Carneiro *et al.*, 1978; Landim, 1984); b) rochas ígneas (de composição predominantemente granítica) do *Complexo Quebra-Cangalha* (Landim, 1984); c) faixas de alta deformação (zonas milonitizadas); d) os terraços fluviais compostos de silte e argila; e e) os sedimentos inconsolidados localizados no leito dos cursos de água.

Pela Figura 2 pode-se perceber que grande parte da área está inserida no *Complexo Embu*, o qual corresponde a 60% da área de estudo. Esta unidade é constituída por rochas metamórficas (gnaisses) que possuem na sua composição minerais mais facilmente alteráveis como micas e feldspatos. Desta maneira, o solo de alteração proveniente destas rochas é normalmente fino onde predominam minerais argilosos favorecendo o desenvolvimento de solos mais impermeáveis e mais homogêneos. Os solos são normalmente espessos e possuem coloração avermelhada devido à presença de minerais ricos em ferro como a biotita. A homogeneidade e a composição fina destes solos são fatores que dificultam o desenvolvimento de processos erosivos acelerados como as ravinas.

A unidade *Granitóide Quebra-Cangalha* corresponde a 25% do mapa geológico sendo constituída predominantemente por granitos leucocráticos (de tonalidades claras). As rochas desta unidade possuem minerais mais resistentes à alteração como o quartzo e o feldspato potássico. Entretanto, em decorrência da presença destes minerais, os solos são predominantemente de coloração esbranquiçada, de constituição areno-argilosa e com a presença significativa de frações minerais mais grosseiras (saibros). A textura grossa destes solos e a ausência de uma cobertura vegetal fornecem as condições favoráveis para a ocorrência de processos erosivos acelerados como sulcos e ravinas.

As *zonas milonitizadas* (ou zonas de cisalhamento) correspondem a cerca de 10% da área total estudada. Estas regiões correspondem a áreas que foram submetidas a intensas tensões tectônicas em condições dúcteis, ou seja, a profundidades maiores que 10 km (Ramsay, 1980). Por esta razão, apresentam uma foliação bastante desenvolvida e a presença de minerais finos com estrutura em camadas como mica e clorita em decorrência de processos de retrometamorfismo devido a percolação de fluidos nas zonas de cisalhamento. A alteração destas rochas produz solos com elevada proporção de argila e não são suscetíveis ao aparecimento de processos erosivos lineares.

A unidade *Terraço Fluvial* e a unidade *Sedimentos Inconsolidados* correspondem a 5% do mapa geológico e representam a planície fluvial do ribeirão Taboão e seus principais afluentes. Nesta área são identificados paleo-terraços com sedimentos de composição pelítica (silte e argila) e, secundariamente, areia e seixos angulosos de quartzo e feldspato. Também se observam sedimentos inconsolidados de cor preta indicando a presença de solos com grande quantidade de matéria orgânica. No aspecto geotécnico constituem-se solos de baixa resistência, saturados em água e propícios à inundação.

2.2 – Caracterização geomorfológica

Apesar da fazenda Santa Edwirges apresentar uma área relativamente pequena, possui uma significativa variação no relevo. Isto se deve, em grande parte, a diversidade do substrato geológico descrita anteriormente. Regionalmente, a área está inserida na unidade geomorfológica do Planalto do Médio Vale do Paraíba (Ponçano *et al.*, 1981).

Com base em elementos morfométricos (hipsometria e declividade), foi possível identificar, três unidades geomorfológicas distintas: Escarpas Degradadas, Morros e Morrotes e Colinas Alveolares. Estas unidades podem ser visualizadas a partir do Modelo Numérico de Terreno (MNT) apresentado na Figura 3, apresentando as seguintes características:

- a) Escarpas Degradadas – ocorrem no terço superior da área estudada apresentando declividades dominantes superiores a 30%, topos normalmente estreitos e alongados e afloramentos esporádicos de blocos de rochas. O substrato destas rochas é formado principalmente pelas

rochas graníticas da Unidade Quebra-Cangalha. Os solos possuem composição areno-argilosa com elevado potencial de erodibilidade.

- b) Morros e Morrotes – ocupam a porção centro-norte da área de estudo apresentando declividades dominantes entre 20 e 30% e topos com formas arredondadas. Neste relevo se observa uma menor intensidade dos processos de dissecação que no relevo de Escarpas Degradadas. Geologicamente, correspondem a rochas gnáissicas e migmatíticas. Os solos associados são normalmente argilosos, espessos e de coloração avermelhada. A atividade erosiva é predominantemente laminar ainda que feições erosivas lineares ocorram de maneira localizada.
- c) Colinas Alveolares – ocupam uma faixa de direção sudoeste/nordeste na parte central da bacia. Representam a transição entre os relevos de escarpas e os relevos de morros e morrotes. Correspondem as áreas de declividade baixa (inferiores a 15%) e as áreas de relevo plano (planícies aluvionares). Em alguns lugares foi possível identificar a deposição de sedimentos recentes (Terciários/Quaternários) os quais correspondem a unidade geológica Terraço Fluvial. Estes relevos possuem grande influência na dinâmica hidrológica da bacia em face de possuírem o nível freático próximo à superfície e se constituírem em um local apropriado para a formação de bacias de retenção.

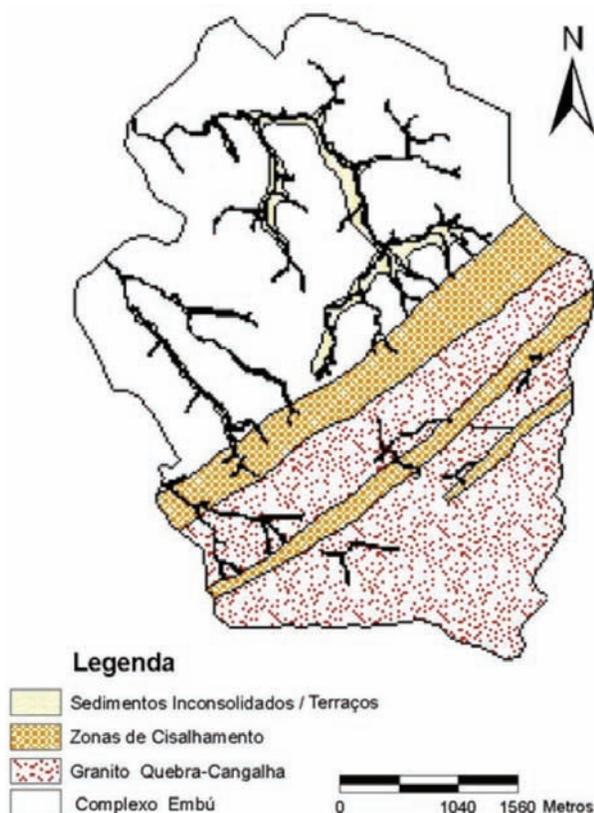


Fig. 2 – Mapa geológico simplificado da área de estudo (Rodríguez e Milanezi, 2005).

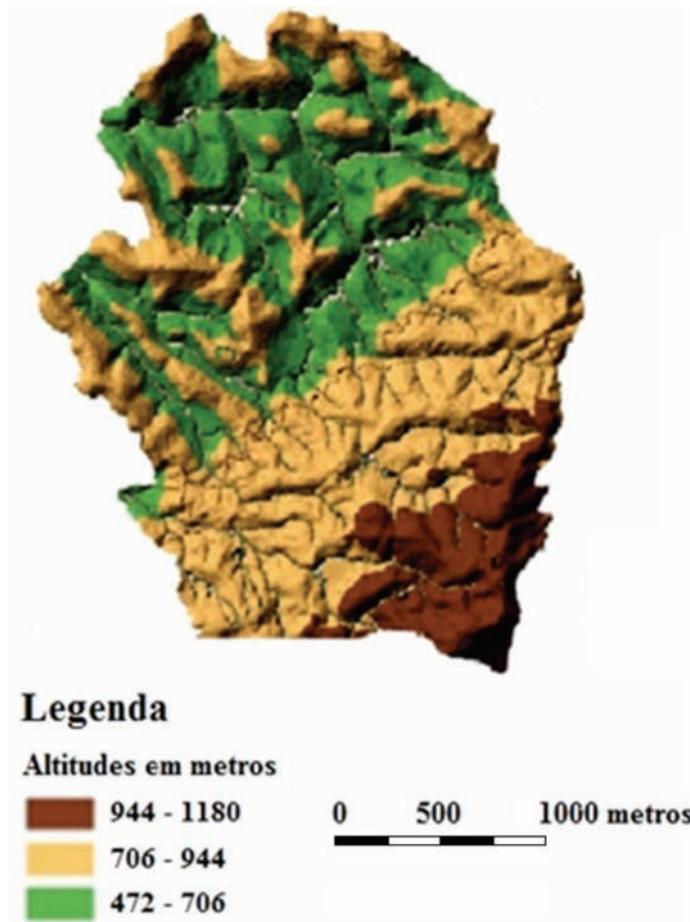


Fig. 3 – Modelo digital das três formas de relevo na fazenda Santa Edwirges: Escarpas (marrom), Colinas Alveolares (verde) e Morros e Morrotes (bege).

2.3 – Pluviosidade da região

Os dados pluviométricos da área de estudo foram interpretados por Freire (2005), utilizando para isso seis estações meteorológicas distribuídas no entorno da área de estudo, bacia do ribeirão Taboão (Figura 4). Três destas estações localizam-se em região de escarpas, duas em região de morros e morrotes e uma em região de colinas alveolares. Os dados de precipitação foram analisados empregando uma série histórica de 30 anos, sendo esta obtida do SIGRH - Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (disponível em www.sigrh.sp.gov.br).

As estações meteorológicas localizadas no relevo de escarpa foram escolhidas por representarem bem a influência do Sistema Orográfico da região, que é a movimentação de massas de ar e de chuva provocadas pelo relevo, isto é, as massas de ar são empurradas morro acima, promovendo esfriamento e condensação da água, formando neblinas, chuviscos ou chuvas na região das escarpas.

O Quadro 1 apresenta a pluviosidade média sazonal e anual das três estações meteorológicas localizadas na região de escarpa, objeto do presente estudo.

Para a determinação do índice de erosividade (EI30) da área de estudo, foi empregada a metodologia proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1980), a qual foi formulada realizando-se

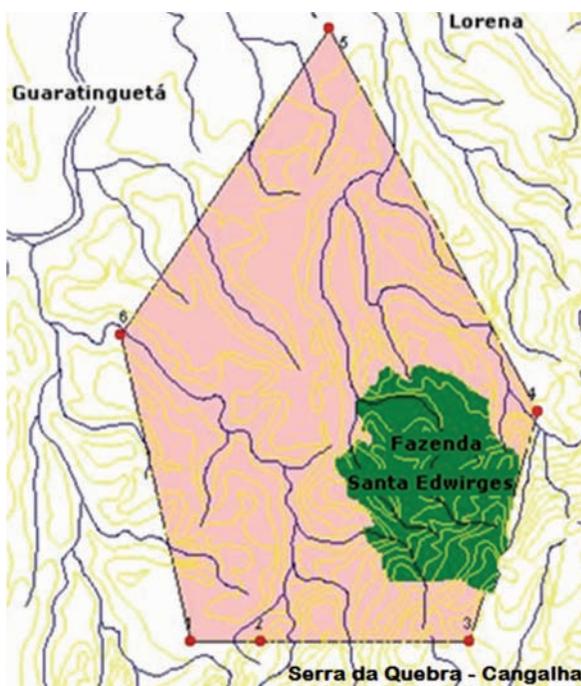


Fig. 4 – Localização das estações pluviométricas. As estações 1, 2 e 3 localizam-se na região de escarpa, a 4 e a 6 em região de morros e morrotes e a 5 em região de colinas alveolares (Freire, 2005).

Quadro 1 – Pluviosidade média sazonal da bacia do ribeirão Taboão-SP (1964 a 1994).

Estações Meteorológicas	Precipitação (mm)				
	Verão	Outono	Inverno	Primavera	Anual
1	652,6	173,6	136,2	514,8	1436,3
2	720,7	196,4	136,9	562,9	1622,1
3	635,1	187,6	142,1	498,5	1334,5
Média	664,46	185,87	138,4	525,4	1464,3

análises de uma série histórica de dados de precipitação de 22 anos da região de Campinas – SP. Esta metodologia foi escolhida, tendo em vista que a intensidade de chuva deste município é semelhante a da região de estudo, conforme as isoietas de precipitação disponibilizadas pelo CPRM – Serviço Geológico do Brasil (disponível em www.cprm.gov.br). Para se calcular o índice de erosividade foi utilizada a equação 1.

$$EI = 67,355 \left(\frac{r^2}{P} \right)^{0,85} \quad (1)$$

EI = média mensal do índice de erosividade em MJ.mm/ha.h;

r = precipitação média mensal em mm;

P = precipitação média anual em mm.

Os índices de erosividade (EI_{30}) foram calculados utilizando-se os dados das três estações pluviométricas localizadas em regiões de escarpas. Os resultados apresentados no Quadro 2 foram determinados considerando os dados de precipitação do período de 1964 a 1994. O EI_{30} médio anual (Quadro 2) para a área de estudo foi de 7611,4 MJ.mm/ha.h. Considerando os valores médios sazonais, tem-se no verão o maior índice médio de erosividade (EI_{30}), 3971,9 MJ.mm/ha.h e no inverno o menor, 344,9 MJ.mm/ha.h, o que era esperado, uma vez que os maiores índices pluviométricos ocorrem no verão e os menores no inverno.

Quadro 2 – Valores médios dos índices de erosividade (MJ.mm/ha.h).

EI_{30} Anual	Verão	Outono	Inverno	Primavera
7611,4	3971,9	503,3	344,9	2791,4

3 – PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

As características geológicas e geomorfológicas da região conforme descritas anteriormente criam um ambiente propício para a formação de grupos de solo com características bem distintas. A caracterização física dos solos da área de estudo é fundamental para uma avaliação do potencial de erosão. Para isso, foram coletadas amostras de solo de onde foi realizado o experimento e de onde foi extraído material empregado no tratamento de envelopamento. Com base nos ensaios de limites de Atterberg e granulometria foi realizada uma avaliação qualitativa do potencial de erosão dos solos em análise.

3.1 – Coleta das amostras

As primeiras amostras definidas por solo 1, foram obtidas do talude onde foi realizado o experimento (talude 1). As coordenadas do ponto de amostragem são 0491937 e 7469689 em UTM. Localizado na região de escarpas, próximo ao divisor de águas o solo apresenta-se pouco evoluído, sendo um solo residual jovem silte-arenoso de cor rosa, onde se observam os processos erosivos em estágio avançado de desenvolvimento (Figura 5).

As segundas amostras obtidas de solo mais evoluído (solo 2) foram retiradas de um outro ponto próximo da região de estudo em área de morros e morrotes, com relevo de declividade média,



Fig. 5 – Localização onde foi coletada a primeira amostra (solo 1).

sendo um solo residual argiloso bem desenvolvido e de coloração avermelhada. Nesta localidade o solo apresentava-se pouco erodido (Figura 6). As coordenadas são 0490663 e 74706340 UTM.



Fig. 6 – Localização onde foi coletada a segunda amostra (solo 2).

3.2 – Ensaios de laboratório

3.2.1 – Granulometria

A análise granulométrica é uma das ferramentas que pode ser utilizada para se avaliar a erodibilidade dos solos. A NBR 7181 (ABNT, 1984) determina que para a realização do ensaio de granulometria é necessária a utilização de um defloculante para provocar o rompimento das ligações elétricas entre as partículas de argila, tornando-as assim, individuais no meio aquoso. Entretanto, este ensaio foi realizado também sem a adição do defloculante de modo a avaliar a capacidade dos minerais argílicos de formarem grumos e de sedimentarem-se mais rapidamente. Assim, quanto maior for a distância entre as duas curvas, maior será a capacidade dos minerais argílicos de se agruparem e conseqüentemente, de resistirem contra a desagregação pelo impacto das gotas de chuva.

Os ensaios de granulometria foram executados visando determinar a porcentagem de dispersão segundo proposta de Volk (1937, *apud* Araújo, 2000). Segundo a equação 2, quanto menor a dispersão entre as curvas com e sem defloculante, maior o potencial de erosão do solo.

$$P_d = \frac{P_1}{P_2} \quad (2)$$

P_d = porcentagem de dispersão;

P_1 = porcentagem de partículas menores de $5\mu\text{m}$ sem dispersante;

P_2 = porcentagem de partículas menores de $5\mu\text{m}$ com dispersante.

Com base na porcentagem de dispersão os solos são interpretados do seguinte modo: se a porcentagem de dispersão for maior que 50% o solo é considerado altamente dispersivo; se estiver entre 20% e 50% é considerado moderadamente dispersivo e se for menor que 20%, não dispersivo.

3.2.2 – Limites de Atterberg

Os procedimentos de ensaios para a determinação dos Limites de Atterberg seguiram as recomendações das Normas ABNT: NBR 6459 - Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984) e

NBR 7180 - Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984), os quais são executados em amostras passadas na peneira #40 (0,42mm). No presente trabalho, esses ensaios foram também realizados utilizando-se o material passado na peneira #200 (0,074mm) para avaliar a influência da parcela de areia fina nos valores de limites de liquidez e plasticidade.

De uma forma qualitativa, a Carta de Plasticidade pode ser dividida em três regiões para uma avaliação do potencial de erosão. A primeira região, definida como de alto potencial de erosão, apresenta solos com limite de liquidez inferior a 30% e índice de plasticidade menor que 15%, ou seja, solos silte-arenosos e argilas arenosas. A segunda região localizada no intervalo $30\% \leq LL \leq 70\%$ e $15\% \leq IP \leq 30\%$ compreende aos solos que apresentam médio potencial de erosão tais como argilas e siltes de baixa plasticidade. A terceira região encontra-se os solos com $LL > 70\%$ e $IP > 30\%$ que são as argilas e siltes de alta plasticidade e por isso apresentam baixo potencial de erosão.

3.2.3 – Ensaio de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão

O procedimento empregado para realização dos ensaios de compactação Mini-MCV e determinação da perda de massa por imersão foi baseado na proposta de Marson (2004) que visou tornar as normas de ensaio DNER-ME 256 (1994): Solos compactados em equipamentos miniatura – Determinação da perda de massa por imersão e DNER-ME 258 (1994): Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV) mais simples e objetivas.

4 – MONTAGEM DO EXPERIMENTO

Inicialmente, houve a necessidade de se fazer a raspagem e a regularização da superfície do talude, devido à existência de irregularidades em sua superfície, oriundas de processos erosivos existentes, conforme pode ser visto na Figura 5. O talude após regularização apresentou uma altura de 6,90 m e inclinação de 60,70°, que são comuns na região de relevo acidentado.

O experimento de campo consistiu na instalação de quatro células com dimensões de 2,0 m × 3,0 m (6 m²), dispostas sobre o talude. As paredes das células eram compostas por tábuas com 30 cm. Para instalação das tábuas no solo, foram escavadas valetas de 10 cm de profundidade e para mantê-las na posição vertical, a parede interna da valeta foi escavada verticalmente. Após o posicionamento das tábuas nas valetas, estas foram preenchidas pelo lado externo com solo compactado e em seguida foram cravados piquetes pelo lado externo da célula para dar maior sustentação às paredes verticais.

Na parte inferior de cada célula fixou-se uma calha platibanda 28 com 15,0 cm de abertura e bocal de 5,0 cm que foi conectada a um tanque de armazenamento com capacidade de 300 litros por meio de tubo de PVC. Os suportes de calhas foram fixados nos piquetes e cravados no solo para o apoio da calha conforme ilustrado na Figura 7.

Para a coleta dos sedimentos, foram instaladas bolsas constituídas de um geotêxtil com abertura de poros de 0,117 mm sendo estas inseridas dentro dos tanques de armazenamento e fixadas na extremidade da tubulação. Pela Figura 8, pode-se observar que além da bolsa de coleta havia também dentro do coletor um pequeno suporte, o qual tinha a função de não deixar que a bolsa de geotêxtil entrasse em contato permanente com a água que era armazenada na caixa de água.

Os sedimentos armazenados dentro das bolsas de geotêxtil serão chamados neste trabalho de sedimentos sólidos, que representam a parcela mais grossa. A parcela fina depositada no fundo do tanque e a parcela em suspensão foram consideradas juntas como sedimentos em suspensão.



Fig. 7 – Instrumentação de campo (exemplo de uma célula completa).



Fig. 8 – Tanque com a bolsa de geotêxtil.

4.1 – Sistema de medição e controle do experimento

4.1.1 – *Escoamento superficial*

A determinação do volume de escoamento superficial foi obtida através de uma régua de nível. Para isso foi montada uma curva de calibração com ajuste por regressão linear relacionando a altura do líquido com o seu correspondente volume (Figura 9). Assim, para a obtenção do volume do escoamento superficial em campo, bastava colocar uma régua dentro de cada coletor (tanques de armazenamento) e fazer a leitura da altura do nível d'água e, com este valor, obter o volume equivalente na curva de calibração.

Como pode ser observado na curva de calibração, o volume do tanque é definido por duas equações, pois a partir dos 31cm de altura há uma variação acentuada do diâmetro do tanque.

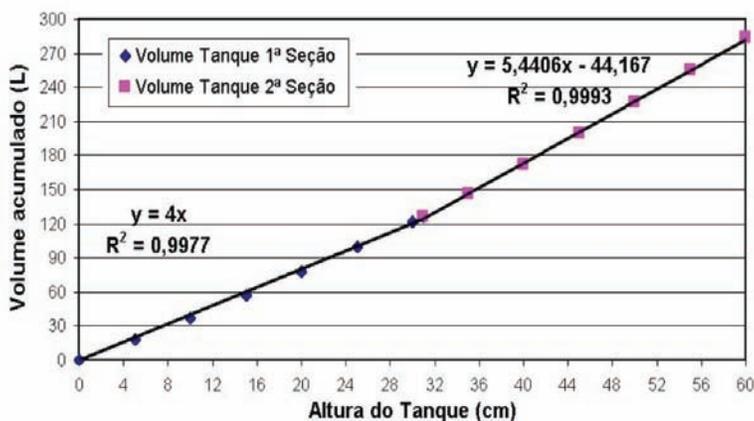


Fig. 9 – Curva de calibração do tanque de armazenamento.

4.1.2 – Determinação do peso de sedimentos em suspensão

Para o cálculo do peso de sedimentos em suspensão, as amostras eram coletadas da solução, água + solo, contida nos tanques de armazenamento, utilizando-se para isso garrafas plásticas de 1000 ml. Antes de se coletar a amostra, a solução era homogeneizada através de intensa agitação. Após cada leitura de campo, os tanques eram esvaziados e limpos. No laboratório, as amostras eram novamente homogeneizadas e partes de seus volumes eram transferidos para cápsulas previamente pesadas. Em seguida, as cápsulas eram postas para secar em estufa a 105 °C durante 24 horas para determinação do peso dos sólidos.

Conhecendo-se o volume inicial colocado nas cápsulas, calculou-se a concentração de sólido em suspensão. O peso total de sedimentos em suspensão fica então determinado pela multiplicação do volume total do escoamento contido no tanque pela respectiva concentração.

4.1.3 – Determinação do peso de sedimentos armazenados nas bolsas de geotêxteis

No processo de coleta de campo, as bolsas com os sedimentos mais grossos eram retiradas e colocadas em baldes para transporte ao laboratório. Para que a próxima medida pudesse ser realizada, uma nova bolsa era fixada junto à tubulação após a limpeza dos tanques.

No laboratório, esse material era retirado da bolsa e pesado em balanças com precisão de duas casas decimais (Figura 10A), em seguida, era homogeneizado em bandejas com a finalidade de uniformizar sua umidade (Figura 10B). Posteriormente, amostras destes sedimentos foram colocadas em cápsulas e secas em estufas a 105 °C durante 24 horas, com a finalidade de se determinar o teor de umidade. Conhecido este teor foi então possível medir de forma indireta o peso seco deste sedimento utilizando a equação 3.

$$P_s = \frac{100 \times P_u}{100 + w} \quad (3)$$

P_s = Peso seco da amostra (kg)

P_u = Peso úmido da amostra (kg)

w = Umidade da amostra (%)

A produção total de sedimentos de solo foi calculada a partir da soma dos pesos secos dos sedimentos em suspensão e dos sedimentos sólidos (armazenados na bolsa de geotêxtil).



Fig. 10 – Processo de medição indireta do peso dos sedimentos sólidos: (A) bolsas de geotêxtil com os sedimentos mais grossos coletados em campos; (B) homogeneização da umidade da amostra.

4.2 – Descrição dos métodos de tratamento

No presente estudo, três métodos de proteção de taludes foram analisados empregando materiais naturais da própria região de estudo, sendo estes:

a) Método A: grama “São Carlos” (*Axonopus compressus*)

A grama “São Carlos”, *Axonopus compressus*, possui alta resistência ao pisoteio, apresenta boa resistência às pragas e ervas daninhas. Adapta-se a locais de meia sombra ou a sol pleno, tem boa tolerância a locais úmidos e frios, formando um tapete bem denso. Possui crescimento variável (Lorenzi e Souza, 2001). Esta espécie de grama estabiliza solos erosivos em regiões de alta pluviosidade, sendo uma excelente proteção para taludes contra o desenvolvimento de processos erosivos (FAO, 2008).

Este tratamento foi instalado, plantando-se mudas de grama em pequenas cavidades na superfície do talude, feitas com ajuda de um pequeno bastão de madeira com uma de suas extremidades aguçadas. Este método foi feito sem a adição de qualquer tipo de insumo agrícola ou solo orgânico, pois estes materiais poderiam interferir na determinação dos sedimentos erodidos.

Devido à fragilidade inicial da grama, foram colocados sobre ela, logo após o término de seu plantio, pequenos ramos de eucalipto, a fim de protegê-la do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial. Esta proteção complementar permaneceu até ser realizada a segunda coleta de sedimentos, 14 dias depois do início do monitoramento.

b) Método B: trama de serrapilheira

O material utilizado no método B é formado por galhos e folhas que são depositados no chão durante o ciclo de crescimento das árvores de eucalipto (*E. Grandis*). Os galhos foram amarrados com arame formando uma trama que era fixada na superfície do talude por piquetes. O arranjo das tramas cobriu toda a célula, formando praticamente um telhado.

c) Método C: envelopamento – solo compactado

O método C consistiu em se revestir uma célula com uma camada de 10 cm utilizando solo local (solo 2), com características mais resistentes aos processos erosivos (solo argiloso tipo CH com perda de massa por imersão de 0% e classificação Mini-MCV, LG¹). A instalação desse tratamento foi realizada pelo lançamento direto do solo sobre face por meio de compactação manual, utilizando-se um pequeno soquete de madeira. Não houve controle de compactação na aplicação do solo de envelopamento, uma vez que o objetivo era propor uma alternativa de proteção para controle de erosão em taludes de estradas rurais não-pavimentadas de fácil aplicação pelos moradores de áreas rurais.

d) Método D: célula de referência (solo natural)

A face do talude na quarta célula (método D) foi mantida na condição natural com o objetivo de servir de referência aos métodos de tratamentos das demais células. Para a sua instalação, foi necessária a regularização da superfície do talude para eliminar as pequenas depressões, onde os processos erosivos poderiam ocorrer de forma mais intensa. Os cálculos da eficiência dos métodos de proteção foram determinados com base na quantidade de sedimentos medidos na célula de referência.

Por meio da Figura 11 pode-se ter uma visão geral da montagem das células no talude com os respectivos métodos de proteção e a posição da célula que foi mantida desprotegida.

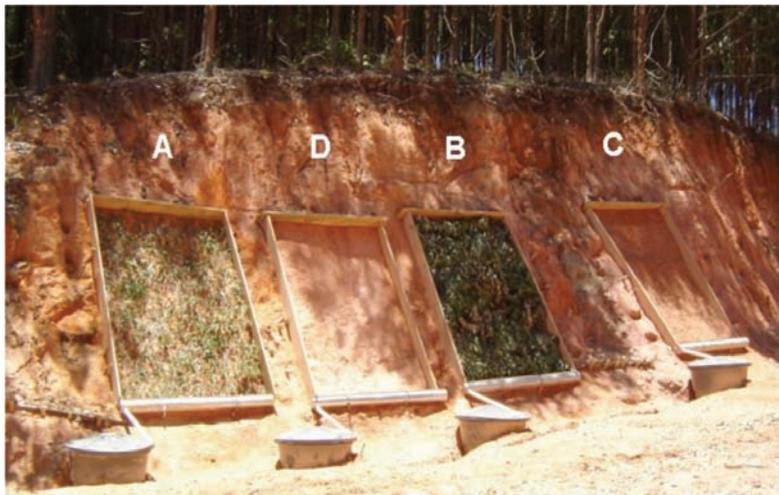


Fig. 11 – Visão geral do experimento: (A) Método A – Grama; (B) Método B – Serrapilheira; (C) Método C – Envolvimento; (D) Método D – Célula de referência.

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 – Ensaios de laboratório

5.1.1 – Granulometria

As curvas granulométricas com e sem defloculante obtidas para os dois solos em estudo estão apresentadas na Figura 12.

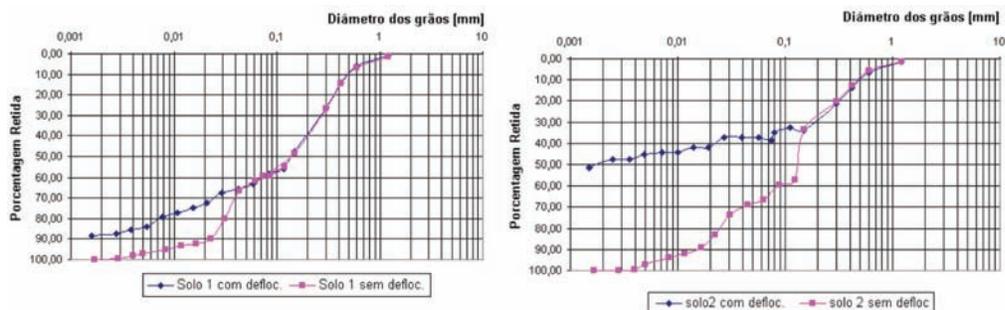


Fig. 12 – Curvas granulométricas: (a) solo 1; (b) solo 2.

Por meio da metodologia desenvolvida por Volk (1937, apud Araújo, 2000) foi possível calcular as porcentagens de dispersão segundo a equação 2. Para o solo 1, a porcentagem de dispersão foi de 20% o que caracteriza um solo com média erodibilidade. No caso do solo 2, a porcentagens de dispersão foi de apenas 5,4% sendo este um solo não dispersivo. Estes resultados são bastante coerentes com os comportamentos observados nos taludes em campo, Figuras 5 e 6.

5.1.2 – Limites de Atterberg

Os resultados dos ensaios de Limite de Liquidez e de Plasticidade realizados para amostras passadas na peneira #40 (conforme norma brasileira) e passadas na peneira #200 estão apresentados no Quadro 3 e na Carta de Plasticidade da Figura 13.

Quadro 3 – Valores dos Limites de Atterberg.

		Diâmetro (mm)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo 1	#40	0,42	28,90	14,20	14,70
	#200	0,07	42,70	30,00	12,70
Solo 2	#40	0,42	64,30	30,80	33,50
	#200	0,07	91,80	54,10	37,70

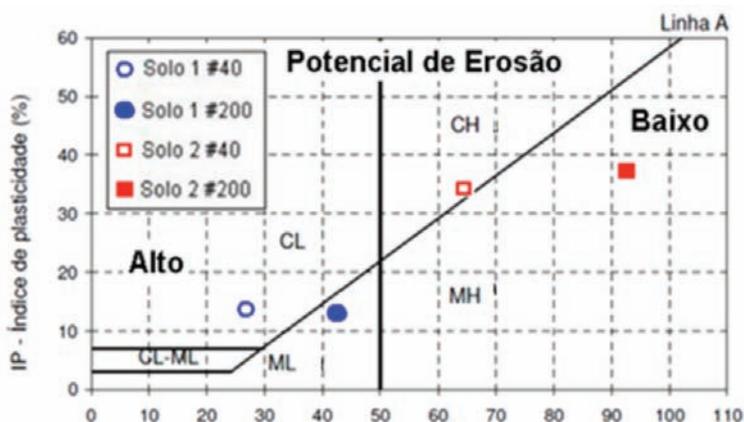


Fig. 13 – Carta de plasticidade.

Para os ensaios realizados segundo a norma brasileira (peneira #40), o solo 1 apresenta-se com um alto potencial de erosão e o solo 2 foi classificado como de baixa erodibilidade.

No presente trabalho foram realizados também ensaios para determinação dos limites de Atterberg, empregando-se o solo passado na peneira #200 (0,074 mm), com intuito de avaliar a influência da parcela de areia fina nos valores de limites de liquidez e plasticidade dos solos ensaiados. Ao analisar os resultados obtidos, concluiu-se que houve um aumento significativo do valor de limite de liquidez dos materiais, fazendo com que o solo 1 passasse para uma situação de erodibilidade média. No caso do solo 2, o aumento do limite de liquidez alterou a classificação do solo para baixa erodibilidade.

5.1.3 – Ensaio de Mini-MCV e de perda de massa por imersão

O Quadro 4 resume os coeficientes de classificação MCT-Modificado obtidos para os solos a partir de ensaios de compactação Mini-MCV e de perda de massa por imersão.

Quadro 4 – Parâmetros de Classificação MCT- Modificado.

Amostra	Parâmetros		
	c'	Pi (%)	e'
SOLO1	1,10	136,25	1,65
SOLO 2	1,83	0,0	0,0

Dispondo-se dos coeficientes classificatórios foi possível obter a classificação do solo 1 e do solo 2 segundo a Metodologia MCT-Modificada, bastando para isto plotar o ponto de coordenadas c' e e' no Ábaco Classificatório desta metodologia (Figura 14).

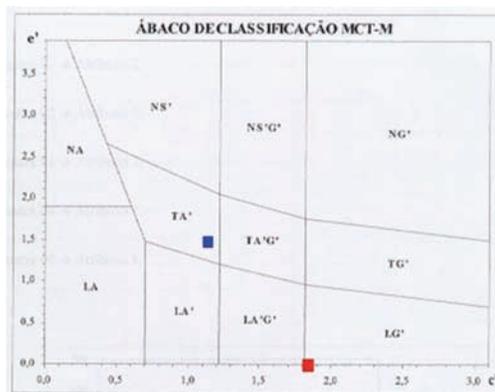


Fig. 14 – Ábaco MCT-M para classificação de solos segundo Vertamatti (1988).

O ponto azul representa os parâmetros obtidos para o solo 1 e o vermelho os do solo 2.

O solo 1 foi classificado como TA' (Solo Transicional Arenoso), denominado por Vertamatti (1988) como um solo ainda não muito afetado pelos processos pedogenéticos, visto que posiciona-se na faixa central do ábaco da Classificação MCT-M. Este solo apresenta um caráter de transição no processo de evolução genética dos solos tropicais, normalmente associados às formações sedimentares e encontram-se na camada superior do perfil do terreno, podendo apresentar condições de drenagem que favorecem sua evolução genética.

O solo 2 obteve a classificação LG' (Solos Argilosos Lateríticos). Este grupo é formado por argilas e argilas arenosas, pertencentes ao horizonte B dos latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas. Quando apresentam percentagens de areia elevadas, têm um comportamento semelhante aos solos arenosos lateríticos LA' (Vertamatti, 1988).

5.2 – Produção de sedimentos

O Quadro 5 apresenta a produção total de sedimentos obtida para as quatro células. A parte experimental foi monitorada no verão entre 13 de janeiro a 13 de março de 2009. Como pode ser observado, o volume total de chuva medido nos dois meses foi superior ao esperado para todo o verão que é em média de 645,7 mm. A primeira coluna do Quadro 5 indica os períodos em que os

tratamentos ficaram expostos aos eventos de precipitação. A segunda descreve o intervalo de tempo entre as leituras. Não houve uma leitura com intervalo fixo devido às condições adversas do tempo e das estradas, uma vez que a área experimental era de difícil acesso. A terceira coluna apresenta o volume de chuva acumulado no respectivo intervalo de leitura. As demais colunas apresentam a quantidade de sedimentos totais divididos pela área total da célula, medidos em kg/m^2 para cada tipo de tratamento empregado no experimento, sendo grama, serrapilheira, envelopamento e célula de referência respectivamente.

A quantidade de sedimentos medidos na primeira leitura está bem superior as demais leituras devido ao solo solto no processo de regularização do talude. Por meio do Quadro 5 observa-se que a quantidade total de sedimentos produzida na célula de referência (Método D) foi muito superior aos demais tratamentos empregados. Nessa célula foi observada a formação do processo de erosão por sulcos.

Quadro 5 – Produção total de sedimentos dos métodos analisados.

Período	Intervalo de coleta (dias)	Altura de chuva (mm)	Gramma (kg/m^2)	Serrapilheira (kg/m^2)	Envelopamento (kg/m^2)	Célula de referência (kg/m^2)
13-22 Jan	9	127	2,85	0,67	2,83	6,60
22-27 Jan	5	60	0,73	0,70	0,90	3,57
27Jan-2Fev	6	87,5	0,46	0,31	0,56	2,44
2-7 Fev	5	52	0,47	0,24	1,46	0,66
7-10 Fev	3	12,5	0,02	0,02	0,05	0,04
10-14 Fev	4	55	0,08	0,02	0,20	0,43
14-25 Fev	11	130	0,94	0,28	3,13	8,66
25Fev-13Mar	16	127	0,69	0,69	1,55	8,58
Total	59	651	6,24	2,94	10,67	30,98

O gráfico de barras da Figura 15 apresenta a comparação da produção total de sedimentos para cada célula no respectivo intervalo de leitura. Dentre os métodos de proteção empregados para o

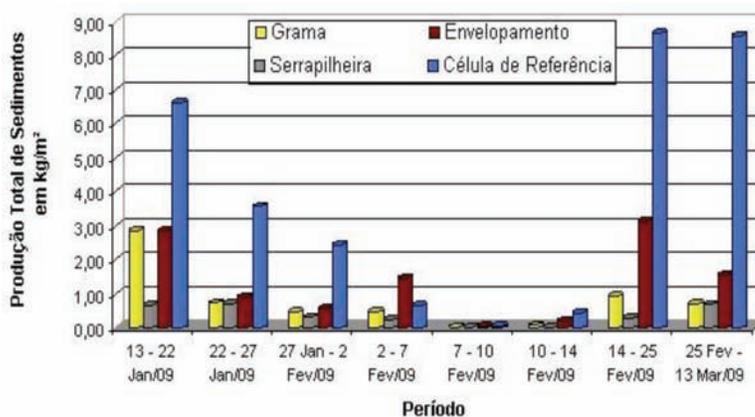


Fig. 15 – Produção total de sedimentos em kg/m^2 para os métodos analisados.

controle dos processos erosivos, o envelopamento foi o que produziu maior quantidade de sedimentos. Na quarta e na quinta leituras realizadas verificou-se que a quantidade de sedimentos na célula com envelopamento foi superior à célula de referência. Nesse caso foi constatado o deslocamento do solo compactado. Com relação aos outros métodos, a serrapilheira foi a que apresentou melhor resultado, seguido pela proteção com grama. A redução de perda de solo registrada para o envelopamento foi de 65%, para a grama foi de 80% e para a serrapilheira foi de 90%.

5.3 – escoamento superficial

O Quadro 6 apresenta o volume de escoamento superficial medido para as três coberturas implantadas e para a célula de referência. Neste Quadro, as três primeiras colunas referem-se ao período de leitura, ao intervalo de coleta e ao total de precipitação respectivamente. As quatro colunas seguintes apresentam os valores de volume de escoamento medidos divididos pela área da célula.

Quadro 6 – escoamento superficial para os métodos analisados.

Período	Intervalo de coleta (dias)	Altura de chuva (mm)	Grama (mm)	Serrapilheira (mm)	Envelopamento (mm)	Célula de referência (mm)
13 - 22 Jan	9	127	41,61	47,05	13,33	25,29
22 - 27 Jan	5	60	32,65	28,91	20,00	18,67
27 Jan-2 Fev	6	87,5	30,73	27,10	21,66	30,73
2 - 7 Fev	5	52	27,10	18,67	14,67	14,67
7 - 10 Fev	3	12,5	0,52	2,67	0,52	0,47
10 - 14 Fev	4	55	13,33	13,33	8,00	10,67
14 - 25 Fev	11	130	47,96	28,91	34,35	44,33
25 Fev-13Mar	16	127	46,14	26,19	37,07	20,00
Total	59	651,00	240,03	192,83	149,60	164,81

Analisando os dados do Quadro 6, verifica-se que o envelopamento foi o que mais contribuiu para a redução da dinâmica do escoamento superficial. Ainda que este método tenha apresentado o menor volume de escoamento superficial, foi o tratamento (dentre os três estudados) o que mais apresentou perda de sedimentos. Isto ocorreu porque durante o período de monitoramento houve destacamento do solo compactado.

Entre as coberturas com grama e serrapilheira, esta última obteve melhor resultado para a redução do escoamento superficial, pois sua trama funcionou como uma barreira ao deslocamento superficial da água, o que possibilitou o aumento da infiltração.

O gráfico de barras da Figura 16 mostra uma comparação do escoamento superficial de cada método de tratamento analisado no respectivo intervalo de leitura. Dentre os métodos de proteção empregados, foi possível observar que a cobertura com grama foi a que menos reduziu a dinâmica do escoamento superficial, apresentando maior volume de escoamento para seis das oito leituras realizadas.

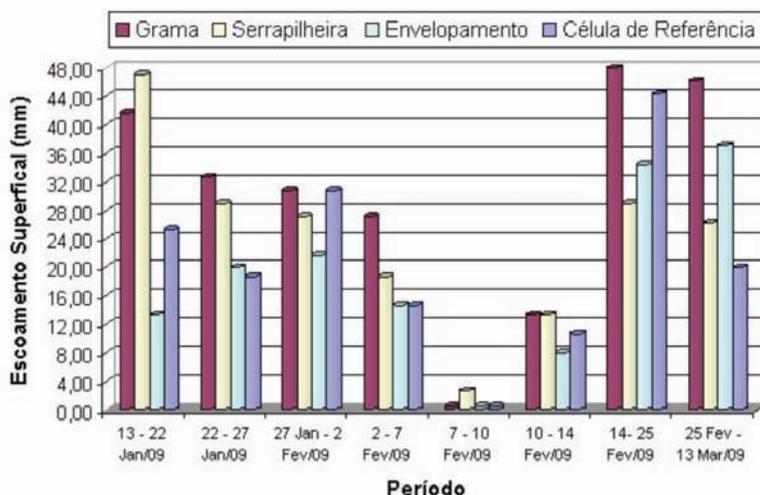


Fig. 16 – Escoamento superficial em mm.

6 – ANÁLISE PRELIMINAR DOS CUSTOS PARA IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO

Tendo em vista que para a realização do experimento foram necessárias a utilização de maquinários e a contratação de mão-de-obra, foi realizada uma avaliação dos custos para a implantação dos métodos de proteção analisados.

O custo de mão-de-obra para a implantação do Método A (Gramma) foi de R\$ 105,00. Este tratamento foi executado por uma pessoa que gastou um dia e meio para executar as seguintes etapas: a) retirada da grama em campo; b) transporte da grama para o local do experimento; c) preparação das mudas; d) plantio da grama sobre a superfície do talude. Em virtude de a grama ter sido obtida na própria área de experimento, esta não apresentou custo para sua aquisição, entretanto houve necessidade de transporte por caminhão da própria fazenda a um custo estimado de R\$ 65,00 por hora.

O Método B (serrapilheira) apresentou um custo de mão-de-obra para sua execução de R\$ 70,00. Para a instalação deste tipo de cobertura foi necessária uma pessoa trabalhando durante um dia para coletar o material em campo, fazer os feixes de serrapilheira e posteriormente fixá-los a superfície do talude com piquetes do próprio eucalipto. Este tratamento não apresentou custo de maquinário, visto que este material existe por toda a área de florestas plantadas.

No Método C (envolvimento), houve a escavação e transporte do solo por equipamentos da própria fazenda com um custo estimado de R\$ 65,00 a hora do caminhão e R\$90,00 a hora da máquina. Para o preparo do solo e lançamento na célula, foi necessária uma equipe de duas pessoas, que realizou o trabalho em um dia. O valor de mão-de-obra para a implantação deste tratamento foi de R\$ 140,00.

Nos custos dos tratamentos descritos acima, não foi considerada na composição do custo total a compra de todo o material utilizado nas montagens das células (tábua de madeira, calhas, tubulação e outros), visto que se estes tratamentos fossem aplicados, estes materiais não seriam utilizados.

Por intermédio dos dados apresentados, pode-se determinar o custo de mão-de-obra e do maquinário necessário para a execução de cada um dos métodos em estudo (Quadro 7).

Observa-se que o método de proteção utilizando a serrapilheira apresentou o menor custo de implantação em relação às outras duas coberturas estudadas. Para as regiões onde não existem florestas plantadas de eucalipto, é possível utilizar soluções alternativas como capim barba de bode, vassoura, palha de milho entre outros.

Quadro 7 – Custo dos métodos analisados.

Método	Custo de mão-de-obra (R\$/m ²)	Custo de transporte e maquinário (R\$/h)
Grama (A)	17,50	65,00 *
Serrapilheira (B)	11,67	-----
Envolvamento (C)	23,33	155,00 **

* Custo de um caminhão para transportar a grama até o local de sua aplicação.

** Custo de uma escavadeira e de um caminhão para transportar o solo de envolvimento até o local de sua aplicação.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Brasil 90% da malha viária é constituída de estradas não-pavimentadas. Visto a sua grande extensão e importância para o desenvolvimento econômico e social é necessário que essas estradas estejam em boas condições, uma vez que se trata do principal meio de escoamento da produção agrícola, como também de permitir às comunidades rurais o acesso à saúde, à educação e a outras necessidades para sua subsistência. A aplicação de sistemas de coberturas de taludes eficientes, de baixo custo e de fácil execução, permite que os próprios produtores rurais possam fazer sua implantação e manutenção, evitando desta maneira problemas de interrupção de tráfego principalmente nos períodos de chuva.

Este trabalho avaliou a eficiência de três diferentes métodos de tratamento de superfície de taludes de estradas. A partir dos dados e resultados obtidos, realizaram-se as seguintes considerações:

- Dentre os métodos analisados, a Serrapilheira foi o método que apresentou o menor custo e maior facilidade de implantação, como também, o melhor desempenho no que se refere ao controle da produção de sedimentos com uma redução de perda de solo de 90%, se comparada com a célula de referência (Método D). Entretanto, por ser um material suscetível à combustão existe o risco de vandalismo e conseqüentemente a perda de proteção do talude.
- A grama foi o segundo melhor tratamento analisado, apresentando um percentual de 80% na redução na produção de sedimentos. Ao longo do período de monitoramento este tipo de cobertura obteve uma evolução em sua capacidade de estabilização, pois à medida que o tempo foi passando houve um melhor enraizamento, aumentando assim a sua eficiência no controle da erosão.
- A cobertura por envolvimento foi classificada como uma proteção instável, pois apresentou deslocamento durante o período de monitoramento. Isso ocasionou sua rápida deterioração. Dentre os tratamentos analisados foi o que mais produziu sedimentos. Para o período de monitoramento, este tratamento apresentou uma redução na produção de sedimento de 65%. Em virtude da inclinação acentuada do talude, esse tipo de cobertura apresentou maior grau de dificuldade para compactação e um custo de implantação mais elevado uma vez que necessitou de maquinário e de uma equipe maior para a execução.

Para outras regiões onde não existam florestas plantadas, a utilização de capim, barba de bode e vassoura, por exemplo, podem apresentar bons resultados sendo soluções viáveis para serem adotadas pelos próprios produtores rurais.

8 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro recebido através do Edital MCT/CNPq 15/2007 Universal – faixa B, processo 474605/2007-B, a Fibria Celulose Ltda por todo o apoio nas atividades de campo para o preparo dos taludes e segurança do experimento e Pró-Reitoria de Pós-Graduação da UNESP pela bolsa de Mestrado CAPES Institucional.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984) – Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 6459. Solo – *Determinação do Limite de Liquidez*.
- ABNT (1984). Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 7180. Solo – *Determinação do Limite de Plasticidade*.
- ABNT (1984). Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 7181– *Solo – Análise Granulométrica*.
- Araújo, R.C. (2000) – *Estudo da erodibilidade de um solo da formação barreiras*. Dissertação de mestrado em geotecnia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 147p.
- Carneiro, C.D.R.; Hasui, Y.; Giancursi, F.D. (1978). *Estruturas da bacia do Taubaté na região de São José dos Campos*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto. Anais, Belo Horizonte: SBG, v. 4, 1978. pp. 247-256.
- Correa, C.M.C. (2005) – *Perdas do solo e qualidade da água procedentes de estrada de uso florestal no planalto catarinense*. Tese de doutorado em ciências florestais, Universidade Federal do Paraná, 155 p.
- Dadalto, G.G.; Carmo Filho, O.G.; Castro, L.L.F (1990). *Captação de águas pluviais das estradas vicinais*. Emcapa Documentos, nº63, Vitória.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – *Anuário estatístico dos transportes*: Geipot. Disponível em: <http://www.dner.gov.br>. Acesso em abril 2008.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem: DNER-ME 256 (1994) – *Solos compactados em equipamentos miniatura – determinação da perda de massa por imersão*.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem: DNER-ME 258 (1994) – *Solos compactados em equipamentos miniatura – Mini-MCV*.
- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) (1991). *Manual de geotecnia: taludes de rodovias - orientações para diagnóstico e soluções dos seus problemas*, 386 p.
- Food and Agriculture Organization of United States (FAO) (2008). *Grassland Species*. Disponível em: <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/GBASE/DATA/pf000180.htm>. Acesso em 27 de novembro de 2008.
- Freire, P.A.C. (2005). *Estudo da pluviosidade na bacia do Ribeirão Taboão – SP, como subsídio para estudo da disponibilidade hídrica da bacia*. Relatório Final de Iniciação Científica, Departamento de Engenharia Civil, UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 42p.
- Hasui, Y.; Sadowski, G. (1976). *Evolução geológica do precambriano na região sudeste de São Paulo*. Revista Brasileira de Geociências, Volume 6, p. 187-200.

- Landim, P.M.B. – coord. (1984). *Mapa Geológico de Estado de São Paulo*. Escala 1:50 000. IGCE/UNESP.
- Lombardi Neto, F.; Moldenhauer, W.C. (1980). *Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP*. Encontro Nacional de Pesquisas sobre Conservação do Solo, 3, Recife. Anais, fl. 13-A.
- Lorenzi, H.; Souza, H.M. (2001). *Plantas ornamentais no Brasil*. 3ª edição, Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora LTDA.
- Marson, M. (2004). *Análise crítica da classificação MCT para solos tropicais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, 184 p.
- Ponçano, W.L.; Carneiro, C.D.R.; Bistrichi, C.A.; Almeida, F.F.M.; Prandini, F.L. (1981). *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500 000. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo – SP.
- Ramsay, J. (1980). *Shear zones geometry: a review*. Journal of Structural Geology, Mainz, Volume 2, pp. 83-99.
- Rodriguez, A.L.V.; Milanezi, B.P. (2005). *Mapeamento lito-estrutural da Fazenda Santa Edwirges*. Escala 1:10 000. Relatório Final de Iniciação Científica, Bolsa VCP-Votorantim, 36 p.
- Souza, C.R. (2000). *Avaliação de diferentes coberturas do solo no controle da erosão em taludes de estradas florestais*. Dissertação de Mestrado em ciências florestais, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 90 p.
- Vertamatti, E. (1988). *Contribuição ao conhecimento de solos da Amazônia com base na investigação de aeroportos e Metodologia MCT e Resiliente*. Tese de doutorado em infra-estrutura de transporte, ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, 276 p.