

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE RAÍZES NA ERODIBILIDADE DE UM SOLO ARENOSO ATRAVÉS DO ENSAIO DE INDERBITZEN

Jéssica Anversa Venturini

Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria
jessicaanversa@hotmail.com

Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Professor Dr. do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria
rinaldo@ufsm.br

Andréa Valli Nummer

Professora Dra. do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria
a.nummer@gmail.com

Resumo. *Para o reforço do solo, proteção e redução dos processos erosivos, há séculos, as técnicas vegetativas são empregadas em obras de engenharia. A maioria das pesquisas que envolvem estas técnicas baseia-se em apurar a eficácia da vegetação acima do solo, poucas estudam o efeito que as raízes apresentam no controle das taxas de erosão. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo principal avaliar o efeito da presença de raízes na erodibilidade de um solo arenoso de origem aluvionar, localizado no distrito de Vale Vêneto, município de São João do Polêsine, no estado do Rio Grande do Sul, por meio de ensaios de Inderbitzen com amostras indeformadas, remoldadas sem raízes e remoldadas com raízes em três taxas distintas (0,5%; 1,0% e 1,5%), oriundas da gramínea esmeralda (*Zoysia japônica Steud*). Foram também realizados ensaios de caracterização física do material em estudo. Os resultados obtidos confirmaram que geralmente a perda de solo é tanto maior quanto maior for a inclinação da rampa e a vazão de ensaio. Ao comparar as amostras remoldadas sem raízes com as amostras remoldadas com 1,5% de raízes na condição de umidade natural, a taxa de erodibilidade apresentou um decréscimo de 38,99%. Na condição de umidade seca ao ar esse número chegou a 79,84%, sendo ainda*

mais expressivo na condição de umidade pré-úmida onde a taxa de erodibilidade atingiu uma queda de 90,44%.

Palavras-chave: *Erodibilidade. Inderbitzen. Raízes.*

1. INTRODUÇÃO

Uma das formas mais agressivas de degradação dos solos está relacionada à erosão, sendo esta responsável por consideráveis danos econômicos. O agente de origem hídrica destaca-se por ser o principal responsável por tal consequência e apresentar maior complexidade, já que engloba fatores climáticos, topográficos, relativos à cobertura vegetal e ao próprio solo, condição esta que é analisada sob o conceito específico de erodibilidade.

Para Barbosa (2008), o processo de erosão causado por este agente deve ser minimizado diminuindo o impacto das gotas da chuva na superfície do solo, e as velocidades e os caudais do escoamento superficial. Para tal, técnicas vegetativas que associam a utilização de materiais biologicamente ativos (ex.: fibras vegetais) com inertes (ex.: concreto, madeira)

podem ser empregadas a fim de remediar tais ações.

A presença ou emprego das plantas pode exercer importante função na preservação do solo, especialmente suas raízes, uma vez que são relevantes quando a biomassa acima do mesmo desaparece. Nesta área, estudos realizados por autores como Bolaños e Casagrande (2014), Lino et al. (2015) e Trindade (2016), mostram a influência das fibras naturais como reforço para os solos. No entanto, estudos relacionados a avaliação da erodibilidade dos solos quando submetidos a essas técnicas ainda são incipientes no Brasil, fazendo-se necessário a realização de pesquisas relacionadas a essa temática.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia do trabalho consistiu em realizar a caracterização do solo através dos ensaios de análise granulométrica (NBR 7181/16); limites de liquidez (NBR 6459/16), limite de plasticidade (NBR 7180/16) e peso específico real dos grãos (NBR 6458/16). O que possibilitou a classificação do solo conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos e a Transportation Research Board.

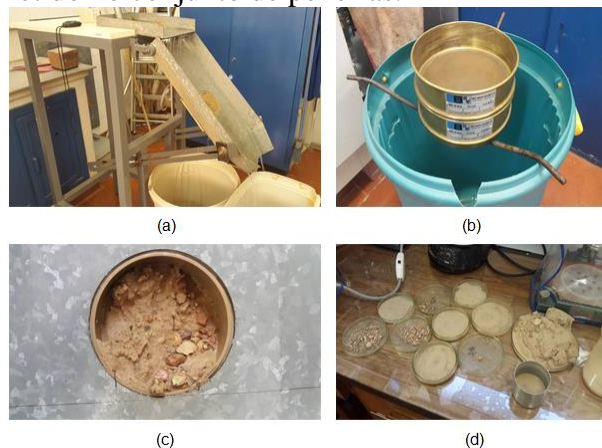
Posteriormente foram realizados ensaios para avaliação direta da erodibilidade por meio do equipamento denominado Inderbitzen empregando-se a metodologia já adotada em pesquisas desenvolvidas anteriormente por Totto (2007), Ávila (2009), Fernandes, J. (2011), Sant'Ana (2012), Basso (2013) e Fernandes, L. (2015).

O equipamento é constituído por uma estrutura metálica, composta de uma rampa hidráulica articulada com 25 cm de largura e 60 cm de comprimento, podendo inclinar-se de 0° a 54°, sendo suportada por uma barra metálica fixa na estrutura principal. Nesta rampa há uma abertura circular central de 10 cm de diâmetro, onde é acoplado um anel

contendo a amostra de solo, de modo que, seu nível superior coincida com o nível da rampa, para que o escoamento laminar entre em contato com o topo da amostra. Na parte superior da rampa, uma fôrma metálica está anexada ao conjunto e possui a função de regularização do fluxo d'água fornecido diretamente da rede hidráulica, através da abertura de um registro.

A vazão utilizada no ensaio é controlada por meio de um rotâmetro que está interligado a canalização. A água e o solo desagregado pelo fluxo são coletados em baldes plásticos com capacidade de 60 litros, nos tempos de 1, 5, 10 e 20 minutos, e posteriormente, passados por peneiras de malhas 042 mm (peneira #40) e 0,074 mm (peneira #200). Em seguida, o solo retido em cada peneira e o remanescente do anel é recolhido, colocado em cápsulas individuais e levado à estufa para a obtenção de seus pesos secos. O mesmo ocorre com o material passante na peneira #200, que é homogeneizado por meio de agitação, colocado em um Becker (300ml) e levado à estufa. A Figura 1 demonstra as etapas do ensaio.

Figura 1. Etapas do ensaio: (a) ensaio em andamento com inclinação de 45° e vazão de 3l/min; (b) conjunto de peneiras utilizado no peneiramento do material erodido; (c) amostra ao término do ensaio; (d) solo seco erodido, retido no conjunto de peneiras.



Foram utilizadas amostras de solo indeformadas, com anéis de PVC de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura para a primeira fase de ensaios. Em seguida, as amostras foram reconstruídas em laboratório, mantendo as características físicas e de umidade de campo. Posteriormente as amostras receberam raízes em três densidades diferentes. Os ensaios foram realizados nas condições de umidade natural, seca ao ar (por no mínimo 72 horas) e pré-umedecida (por ascensão capilar, por no mínimo 24 horas). As variáveis de ensaio empregadas nesta pesquisa foram as mesmas adotadas por Bastos (1999), com inclinações de rampa de 10°, 26° e 45° e vazões de 3l/min e 6l/min.

As amostras indeformadas foram moldadas no talude diretamente em anéis de PVC em apenas um dia de coleta, suprimindo a necessidade para realização de todos os ensaios. Para a moldagem das amostras reconstruídas sem raízes, o solo foi preparado com valor igual ou muito próximo da umidade média obtida nas amostras indeformadas ($w = 17,25\%$). Devidamente umedecido e misturado, foi ensacado por um período mínimo de 24 horas para completa homogeneização do material com a água. Cumprido este processo, com o auxílio de uma balança pesou-se a quantidade de solo necessária para obter-se o valor médio de peso específico natural para o volume de cada anel utilizado. A compactação foi realizada em uma única camada com o auxílio de uma prensa manual com anel dinamométrico acoplada a um soquete metálico.

Para a confecção das amostras com raízes, foram empregadas raízes da gramínea esmeralda (*Zoysia japonica* Steud) com comprimento médio de 2,5 cm, igual à metade da altura dos corpos de prova, e diâmetro médio de 0,5 mm. Foram adotadas três taxas distintas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%), que resultam em quantidades de 200, 400 e 600 raízes nos corpos de prova. Estes valores

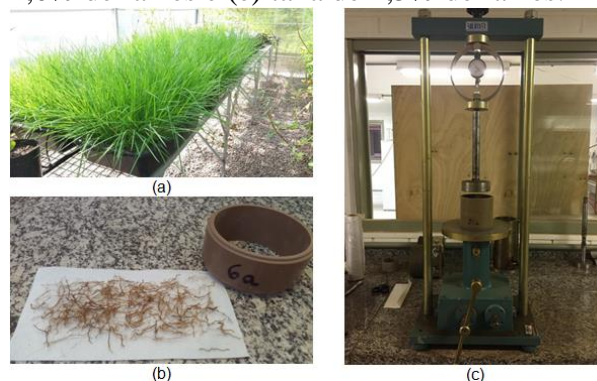
foram obtidos através da multiplicação da área da seção transversal do CP (78,54cm²) pela densidade de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%), divididos pela área da seção transversal das raízes (0,00196 cm²).

Para a preparação de cada corpo de prova remoldado com a presença de raízes, estas foram cortadas, lavadas e contadas para posterior mistura aleatória no solo. A gramínea esmeralda foi escolhida por ser encontrada facilmente em nossa região, possibilitar a fácil retirada de raízes (leivas mantidas em laboratório) e ser uma espécie muito utilizada para proteção de taludes em obras de engenharia.

As amostras indeformadas e deformadas de solo utilizadas nos ensaios são provenientes do distrito de Vale Vêneto, em São João do Polêsine, Rio Grande do Sul, localizado nas coordenadas: 29°39'08,51"S e 53°31'40,14"W. O local constitui-se de uma área destinada para a realização de experimentos do Laboratório de Engenharia Natural da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

A Figura 2 mostra a gramínea esmeralda com crescimento dentro de laboratório, as três taxas de raízes aplicadas nos ensaios de Inderbitzen e o compactador utilizado para auxiliar a remoldagem das amostras.

Figura 2. (a) gramínea esmeralda; (b) taxa de 0,5% de raízes; (c) equipamento que auxiliou na compactação das amostras; (d) taxa de 1,0% de raízes e (e) taxa de 1,5% de raízes.





3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios de Caracterização

A caracterização física e determinação dos índices físicos do solo foram realizadas por meio dos ensaios de peso específico real dos grãos, limites de Atterberg e análise granulométrica com e sem uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio). A Tabela 1 apresenta os resultados para três repetições de ensaios de peso específico real dos grãos e limites de consistência.

Tabela 1. Resultado dos ensaios de peso específico real dos grãos e limites de Atterberg

Identificação	γ_s (kN/m ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Ensaio 1	26,64	25	16	9
Ensaio 2	26,63	28	17	11
Ensaio 3	26,45	29	16	13
Média	26,57	27	16	11

Obs.: γ_s = Peso específico real dos grãos; LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de Plasticidade; IP = Índice de Plasticidade.

O peso específico real dos grãos apresentou como resultado médio o valor de 26,57 kN/m³, valor consistente com a mineralogia de solos arenosos. Quanto ao índice de plasticidade, o solo foi classificado como mediamente plástico já que possui IP = 11%.

Os resultados referentes as classes de tamanhos das partículas de solo para cada uma das situações de ensaio (com e sem uso de agente defloculante) e a classificação do mesmo segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e o Transportation Research Board são apresentados na Tabela 2. A divisão adotada para as frações constituintes do solo foi proposta pela NBR 6502/1995.

Tabela 2. Resumo dos ensaios de granulometria e classificação do solo

Identificação	Frações Granulométricas (%)						Classif. Geotécnica	
	Pedr.	Ar. Grossa	Ar. Média	Ar. Fina	Silte	Argila	SUCS	TRB
Ensaio 01	C/D	0	0	13	51	22	14	
	S/D	0	0	12	58	30	0	
Ensaio 02	C/D	0	0	12	53	18	17	SC A-4
	S/D	0	0	11	60	27	2	
Ensaio 03	C/D	0	0	13	56	13	17	
	S/D	0	0	12	63	23	2	
Média	C/D	0	0	13	53	18	16	
	S/D	0	0	12	60	27	1	

Obs.: C/D = com defloculante; S/D = sem defloculante.

Nota-se que o solo não apresenta partículas do tamanho pedregulho e areia grossa. Há areia média e fina como frações predominantes do material, correspondente a 66% com o uso do defloculante e 72% sem utilizá-lo.

Observa-se que, nos ensaios realizados sem o uso de hexametáfosfato de sódio, o valor médio de argila encontrado foi de 1% enquanto que, nos ensaios com o agente defloculante, a porcentagem média foi de 16%. Tal diferença decorre da formação de grumos (partículas de menor dimensão aderidas) nos ensaios sem o defloculante.

De posse destes valores, foi calculado o grau de flocculação, correspondente a 93,75%, onde valores próximos de 100% informam agregados de solo mais estáveis. Já, de acordo com a NBR 13602/1996 o grau de dispersão natural do solo foi de 6,25%, caracterizando um solo menos disperso (a determinação deste parâmetro só pode ser realizada para teores de argila ($d < 0,005\text{mm}$) superiores a 12%).

Conforme a classificação textural, o solo foi classificado como uma areia fina siltosa. Por meio do Sistema Unificado de Solos, o solo possui a classificação SC – areia argilosa e conforme a TRB o solo é descrito como A-4 – solo siltoso com pequena quantidade de material grosso e de argila.

A Tabela 3 apresenta os índices físicos obtidos nas amostras indeformadas que foram utilizados como parâmetros para moldagem das amostras reconstruídas. Os maiores coeficientes de variação foram obtidos para os

valores de grau de saturação, índice de vazios e teores de umidade. De acordo com IAEG (1979), o solo apresenta média porosidade ($35 < n < 45$) e quanto ao grau de saturação é denominado muito úmido ($50\% < S < 80\%$).

Tabela 3. Propriedades índices do solo

Valores	w (%)	Peso específico natural (kN/m ³)	Peso específico aparente seco (kN/m ³)	e	n	S (%)
Média	17,25	17,13	14,65	0,82	0,44	57,34
Valor máximo	23,02	21,87	1,86	1,08	0,52	100,00
Valor mínimo	12,77	15,04	1,11	0,43	0,30	41,80
Desvio Padrão	2,33	0,12	0,12	0,13	0,04	10,73
Coef. de Variação	0,14	0,01	0,01	0,16	0,09	0,19

Obs.: w = teor de umidade; e = índice de vazios; n = porosidade e S = grau de saturação.

3.2 Ensaio de Inderbitzen

Os resultados dos ensaios de Inderbitzen são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de Interbitzen – Perda de Solo (10^{-3} g/cm²/min), para diferentes condições de fluxo (Q = vazão e i = inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros τ_{crit} (Pa) e K (10^{-2} g/cm²/min/Pa)

Identificação	Condição	Q = 3l/min			Q = 6l/min			τ_{crit} (Pa)	K (10^{-2} g/cm ² /min/Pa)
		Inclinação	i=10°	i=26°	i=45°	i=10°	i=26°		
	Tensão Hidr.	1,136	1,710	2,585	1,393	2,018	2,742		
I	nat	0,021	0,061	0,090	0,028	-	-	0,550	4,91
	sa	0,037	0,078	0,493	0,042	-	0,445	1,200	30,85
	pu	0,004	0,010	0,059	0,006	-	-	1,136	3,99
R - sem raízes	nat	0,541	2,396	3,620	0,865	2,806	4,899	0,900	250,33
	sa	0,399	0,963	-	0,165	1,717	-	1,000	163,70
	pu	0,030	-	-	0,377	1,684	1,733	0,950	113,15
R - 0,5% raízes	nat	0,198	1,691	3,797	0,524	2,442	4,981	1,136	287,25
	sa	0,483	2,171	-	0,752	-	2,710	0,700	138,62
	pu	0,030	-	-	0,033	0,169	0,722	1,136	43,01
R - 1,0% raízes	nat	0,494	2,056	2,701	0,608	2,044	4,453	0,980	212,53
	sa	0,025	0,318	0,680	0,032	-	-	1,136	48,04
	pu	0,030	-	-	0,074	0,289	0,312	1,136	18,94
R - 1,5% raízes	nat	0,685	1,524	3,214	0,848	1,785	2,748	0,750	152,73
	sa	0,161	0,185	0,658	0,261	0,376	-	0,850	33,00
	pu	0,027	-	-	0,032	0,151	0,184	1,000	10,82

Obs.: (I): indeformada; (R): Remoldada; (-): valores discrepantes removidos para o ajuste das retas.

É possível observar que as amostras indeformadas apresentaram os menores valores para os coeficientes de erodibilidade (k) nas três condições de umidade. Notou-se que o material era desprendido quando encontrava zonas mais “fracas” nos corpos de prova. Para as duas vazões de água, nas três inclinações de rampa e nas condições de

umidade natural e pré-úmida, ao final do ensaio, as amostras permaneceram quase que iguais ao seu estado inicial.

Ao ensaiar as amostras remoldadas sem raízes, a grande perda de material pelo fluxo concentrado de água foi facilmente visualizada já nos primeiros minutos de ensaio, principalmente na condição de umidade natural, elevando bruscamente os valores de coeficiente de erodibilidade. O solo erodido era caracterizado por grande quantidade de material fino, retido na peneira de número 200. Para as vazões de 3 e 6l/min, na maior inclinação de rampa e na condição de umidade natural, restaram apenas algumas gramas de material dentro dos corpos de prova. Ao remoldar os corpos de prova com as mesmas características de campo, a estrutura foi totalmente alterada o que facilitou o arraste das partículas.

Ao introduzir as raízes nas amostras, pode-se verificar que estas formavam uma estrutura de proteção nos corpos de prova, preservando o solo e amortecendo o impacto do fluxo de água. À medida que aumentava o número de raízes, os resultados mostraram-se mais significativos quando comparados com as amostras remoldadas sem raízes.

Ao comparar as amostras remoldadas sem raízes com as amostras remoldadas com 1,5% de raízes na condição de umidade natural, a taxa de erodibilidade apresentou um decréscimo de 38,99%. Na condição de umidade seca ao ar esse número chegou a 79,84%, sendo ainda mais expressivo na condição de umidade pré-úmida onde a taxa de erodibilidade atingiu uma queda de 90,44%.

Bastos (1999) sugere que numa primeira aproximação, os solos mais erodíveis apresentam valores de K na condição natural superiores a um valor limite aproximadamente a 0,1 g/cm²/min/Pa e que os solos mais resistentes à erosão apresentam valores de K inferior a 0,001/cm²/min/Pa. Portanto,

segundo a sugestão do autor, todos os grupos de amostras são classificados como solos erodíveis, apresentando taxas de erodibilidade extremamente elevadas, exceto para as amostras indeformadas nas condições naturais e pré-úmidas.

A Figura 3 e a Figura 4 apresentam os resultados obtidos no ensaio Inderbitzen para a perda de solo (g/cm²/min) pela tensão hidráulica para as amostras estudadas.

Figura 3. Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras, (a) Indeformadas, (b) Remoldadas sem Raízes, (c) Remoldadas com 0,5% de raízes, (d) Remoldadas com 1,0% de raízes e (e) Remoldadas com 1,5% de raízes, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-úmida.

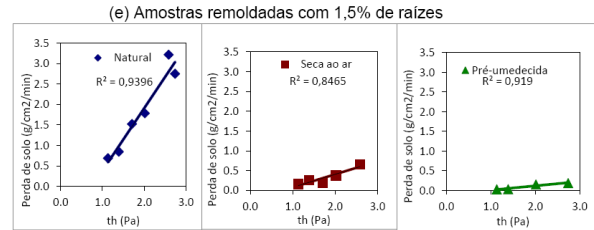
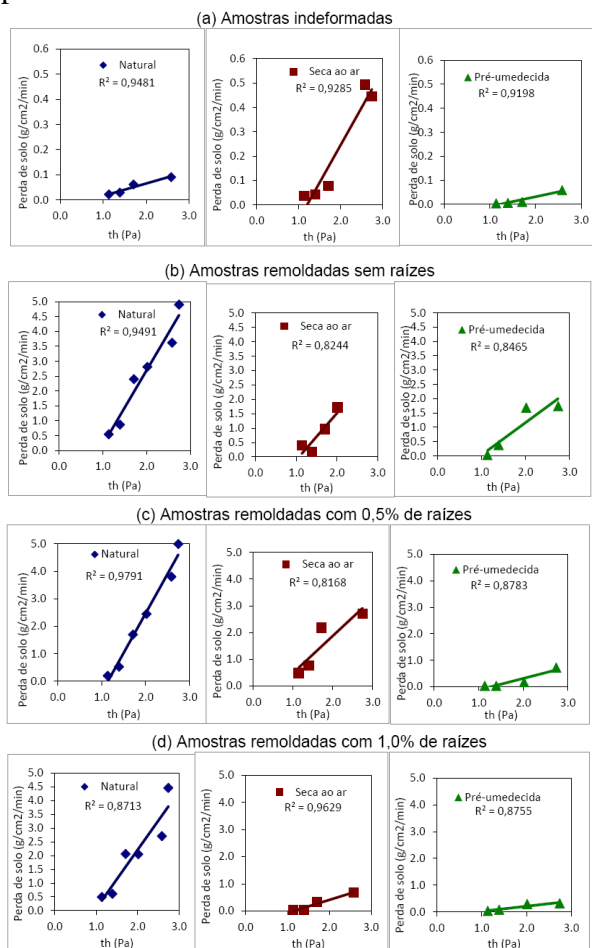
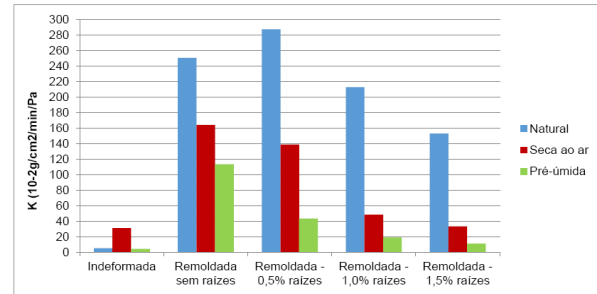


Figura 4. Valores da taxa de erodibilidade (K) obtidos em ensaios de Inderbitzen



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O local da coleta das amostras foi selecionado em função de ser uma área utilizada na realização de experimentos e pesquisas do Laboratório de Engenharia Natural da Universidade Federal de Santa Maria. Na região de análise não foram observadas feições erosivas e processos de degradação já que o solo estava protegido por densa camada de gramíneas e arbustos de pequeno porte, além do talude ser ancorado por uma estrutura composta por pedras e concreto.

A escolha por um solo arenoso (geralmente apresenta maior propensão à erosão) tonaria mais evidente e de fácil visualização o efeito que as raízes poderiam oferecer a este tipo de material. Pensando nisso, avaliou-se a erodibilidade de 5 grupos de amostras (indeformadas, remoldadas sem raízes, remoldadas com 0,5%, 1,0% e 1,5% de raízes). Na comparação entre os dois primeiros grupos foi possível avaliar a influência que a estrutura tem sobre os resultados. Em seguida, com a intenção de mensurar o efeito das raízes sem o efeito da estrutura, foram ensaiadas

amostras com três diferentes taxas da fibra natural, mantendo constante diâmetro e comprimento das mesmas.

Apesar dos valores elevados de coeficiente de erodibilidade foi possível verificar que as raízes apresentaram papel fundamental na diminuição da suscetibilidade à erosão. A redução da taxa de erodibilidade mais significativa se mostrou nas amostras com maior densidade de raízes (600 raízes por CP), na condição pré-úmida, com valores da ordem de 90% quando comparados com as amostras remoldadas sem raízes.

Vale ressaltar que neste estudo as raízes desempenharam o papel de fibras, pois foram inseridas de forma aleatória nos corpos de prova. Acredita-se que em seu estado natural, possam fornecer ainda mais benefícios no local onde estão inseridas, uma vez que interagem com o solo, alterando as propriedades físicas e químicas do mesmo, agindo como agente cimentante, apresentando uma melhor adesão com sua matriz.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 6p. Origem: MB-30.

_____. **NBR 6458**: Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm – Determinação da massa específica (Anexo B). Rio de Janeiro, 2016. 10p. Origem: MB-29.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p. Origem: MB-31.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 13p. Origem: MB-32.

AVILA, L.O. **Erosão na microbacia do Arroio Sarandí**: Voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria, RS. 2009. 103f. Dissertação

(Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

BASSO, L. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas sedimentares de uma voçoroca na cidade de São Francisco de Assis - RS**. 2013. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 251f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

FERNANDES, J. A. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentin, RS**. 2011. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

FERNANDES, L. P. **Avaliação da erodibilidade de um perfil de solo típico da área do campo de instrução de Santa Maria, RS**. 2015. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SANT'ANA, K. D. A. **Diagnostico ambiental do meio físico do Campo de Instrução de Santa Maria (CISM)**. 2012. 125 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

TATTO, J. **Análise dos parâmetros geológicos-geotécnicos que condicionam erosão por voçoroca no município de São Francisco de Assis**. 2007, 84f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.