

Avaliação da Condutividade Hidráulica de um Solo Utilizado em Aterro Sanitário em Santa Maria Através de Ensaios de Campo e de Laboratório

Lucas Eduardo Dornelles

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, lucaseduardodornelles@yahoo.com.br

Henrique Bolacel Antunes

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, Brasil, hbolacelantunes@yahoo.com

Tairine Rodrigues Sanguebuche

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, Brasil, tairine.rodriques17@hotmail.com

Alison Veras

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, Brasil, alisonveras@yahoo.com.br

Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, Brasil, rinaldo@ufsm.br

RESUMO: O estudo e avaliação da condutividade hidráulica de um solo para a disposição de resíduos sólidos é muito importante, de forma a proporcionar a criação de uma barreira de minimização do fluxo de líquidos provenientes da decomposição do resíduo. Quando infiltrados, esses líquidos podem contaminar as camadas inferiores do solo e o lençol freático. Para implantação desta pesquisa, buscou-se uma área que fosse relevante para a determinação da permeabilidade do solo. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo a análise do solo de uma área situada na central de resíduos sólidos do bairro Caturrita, em Santa Maria-RS, com o intuito de comparar ensaios de campo e de laboratório para determinação da condutividade hidráulica do solo natural. Em laboratório, foi realizado o ensaio de permeâmetro de parede rígida com carga hidráulica variável. Em campo, foram realizados os ensaios de infiltrômetro de anel, ensaio de furo de sondagem, ensaio com piezômetro escavado e ensaio de Boutwell. De acordo com a análise dos resultados, o solo caracteriza-se como um silte argiloso plástico, que sofre grande mudança de volume. Utilizando diferentes metodologias de ensaios para determinar a capacidade de infiltração e permeabilidade do solo, foram encontrados valores que variam na ordem de $3,40 \times 10^{-5}$ m/s a $8,24 \times 10^{-9}$ m/s. Todos os valores médios encontrados podem ser considerados de muito baixa ou baixíssima permeabilidade. Dessa forma, fica evidente a importância dos ensaios de campo no estudo da condutividade hidráulica em projetos de aterros sanitários. De acordo com a normatização, uma camada impermeabilizante deve ser implantada na base de um aterro sempre que houver predominância no subsolo de material com condutividade hidráulica superior a 5×10^{-7} m/s. Neste caso, é possível concluir que de acordo com essa recomendação, haveria necessidade de uma proteção adicional.

PALAVRAS-CHAVE: Condutividade hidráulica. Solo Natural. Ensaios de Laboratório. Ensaios *in situ*.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos grandes problemas

ambientais está relacionado à disposição dos resíduos sólidos no meio ambiente. Segundo Jucá (2003), os aterros sanitários representam,

com algumas poucas exceções, a principal destinação final dos resíduos sólidos, apesar do imenso esforço em reduzir, reutilizar e reciclar. O depósito de tais materiais em aterros sanitários deve estar de acordo com critérios pré-estabelecidos, como seleção de área adequada, execução de impermeabilização, drenagem e tratamento dos líquidos e gases gerados. De acordo com Boscov (2008), o princípio do aterro de resíduos é controlar a migração de contaminantes para o meio ambiente mediante a contenção dos resíduos.

A seleção da área para a instalação dos aterros deve atender a vários cuidados especiais e técnicas específicas, entre eles, análise da permeabilidade do solo, profundidade do nível de água e tipo de solo.

A condutividade hidráulica é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o grau de permeabilidade expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade. Ela tem vital importância em obras de engenharia que envolvem a percolação por meio poroso, como barragens de terra, estabilização de taludes, investigação de contaminação de solo e impermeabilização de base e topo de aterros sanitários, entre outros.

A avaliação e o estudo da condutividade hidráulica de um solo destinado à disposição de resíduos sólidos é muito importante, de forma a proporcionar a criação de uma barreira de minimização do fluxo de líquidos provenientes da decomposição do resíduo. A infiltração desses líquidos tem potencial de contaminação das camadas inferiores do solo e do lençol freático.

Para a implantação dessa pesquisa, buscou-se uma área que fosse relevante para a determinação da condutividade hidráulica do solo. Neste contexto, realizou-se um estudo comparativo de diferentes métodos para estimativa desta propriedade do solo natural disponível na área da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da Caturrita, em Santa Maria/RS, por meio de ensaios de campo e de laboratório.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo compreendeu a análise da condutividade hidráulica de um solo através de ensaios de campo e de laboratório em uma área situada na Central de Resíduos Sólidos da Caturrita, em Santa Maria/RS.

2.1 Estudo de escritório

O estudo de escritório consistiu em uma revisão dos tipos de ensaios e de equipamentos para a determinação da condutividade hidráulica em campo e em laboratório.

2.2 Área de estudo

O aterro sanitário está localizado no interior da sub-bacia hidrográfica do Arroio Ferreira, na cidade de Santa Maria/RS. O substrato geológico é constituído por rochas da formação Santa Maria – membro Alemoa. De acordo com Maciel Filho (1990), esta formação é constituída por siltitos argilosos maciços e arenitos argilosos, vermelhos, com folhelhos na base, apresentando mica e concreções calcíferas irregulares. Seu argilomineral mais comum é a montmorilonita.

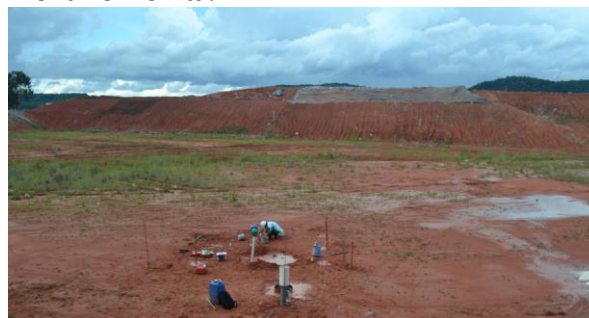


Figura 1 – Área de estudo

2.3 Retirada de amostras

Para caracterização do solo em laboratório, foram retiradas amostras deformadas na mesma profundidade onde foram realizados os ensaios de permeabilidade de campo. Foram retiradas, também, duas amostras indeformadas com o cilindro metálico tipo tubo amostrador, do mesmo local onde foram realizados os ensaios em campo. Estas amostras foram utilizadas para determinar os índices físicos e avaliar a permeabilidade do solo em laboratório em sua estrutura natural, através do permeâmetro tipo tubo amostrador.

2.4 Ensaios de laboratório

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM, com a utilização da amostra deformada. São eles a determinação do peso específico real dos grãos, de acordo com a NBR 6508 – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica; análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, preconizada pela norma NBR 7181- Solo- Análise granulométrica; e limites de Atterberg, de acordo com NBR 6459- Solo- Determinação do limite de liquidez – Método de ensaio e NBR 7180- Solo- Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio.

Com as duas amostras coletadas em campo, realizou-se o ensaio de permeâmetro de parede rígida para determinação da permeabilidade em laboratório. O sistema de controle do ensaio foi o de carga hidráulica variável, de modo que o volume infiltrado e a variação da carga hidráulica são medidos através de uma bureta graduada.

2.5 Ensaios de campo

A avaliação da capacidade de infiltração e condutividade hidráulica foi realizada em campo, através dos ensaios de infiltrômetro de anel, furos de sondagem, piezômetro escavado e permeâmetro de Boutwell. Estes ensaios permitem a análise de um volume maior de solo, representando uma área maior do terreno. Porém, estão sujeitos a uma série de erros, como falta de precisão nas medidas dos elementos geométricos, amolgamento do solo devido à perfuração e variabilidade da temperatura na hora do ensaio. Os ensaios de campo seguiram os procedimentos preconizados no boletim técnico nº 4 - Ensaios de permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo da ABGE (1996).

2.5.1 Ensaio com Infiltrômetro de Anel

Neste ensaio, dois anéis (um de 25cm e outro de 50cm de diâmetro) são cravados no solo até

uma profundidade de 15cm com o auxílio de uma marreta. Após, o espaço entre os dois anéis é preenchido com água, mantendo a região saturada. Com a utilização de um saco plástico, a área interna do anel menor é isolada. Em seguida, adiciona-se água formando uma lâmina de aproximadamente 5cm, que será mantida em nível constante.

Com a retirada do saco plástico, é permitida a infiltração de água no anel menor. Na medida em que a água vai infiltrando, uma boia libera a entrada de mais água. Um reservatório externo graduado que está vinculado à boia é utilizado para medição da infiltração em intervalos de tempo pré-estabelecidos.

2.5.2 Ensaio em Furo de Sondagem

Neste ensaio, dois furos de 40cm de profundidade são feitos com um trado. Um furo é revestido de PVC até o final, para determinação da permeabilidade vertical (kv) e no outro deixa-se uma altura livre de 20cm, para determinação da permeabilidade horizontal (kh). Utiliza-se uma bureta graduada para medir a infiltração do solo através da variação de carga hidráulica.

2.5.3 Ensaio com Piezômetro escavado

Inicialmente, faz-se a abertura do furo de sondagem a trado manual até a profundidade de 40 cm. Coloca-se um tubo de PVC ranhurado dentro do furo apoiado sobre uma pequena camada de areia, que serve para regularizar o fundo. Executa-se o filtro com o preenchimento do espaço entre o tubo de PVC e o furo de sondagem com areia limpa. Para finalizar, coloca-se o selo de bentonita, que deve garantir o selamento perfeito.

Os volumes infiltrados no solo são determinados com o auxílio de uma bureta graduada conectada a um tubo de PVC externo ao furo. Através da bureta, medem-se as diferenças de cota em intervalos de tempo.

2.5.4 Ensaio de Boutwell

Daniel (1989) forneceu uma análise excelente de métodos para estimar a condutividade

hidráulica em campo, com destaque para o método com permeâmetro de Boutwell. Este ensaio consiste em um furo de sondagem de 100mm de diâmetro, executado com trado manual com 30 cm de profundidade. Para revestir o tubo, utilizou-se um tubo de PVC 60mm. O espaço livre entre o furo e o PVC foi preenchido com bentonita, com o objetivo de vedação do furo.

Inicialmente, determina-se a permeabilidade k_1 , que é a infiltração no fundo do furo medida pela diferença de carga hidráulica em uma bureta graduada. Após isso, o furo anterior é aprofundado para um furo de 15cm com a utilização de um trado mais fino que o tubo de PVC. Desta forma, determina-se a permeabilidade k_2 . Por último, o furo é aprofundado novamente mais 15cm, totalizando uma altura livre em tubo de 30cm. Assim, a permeabilidade k_2 é recalculada.

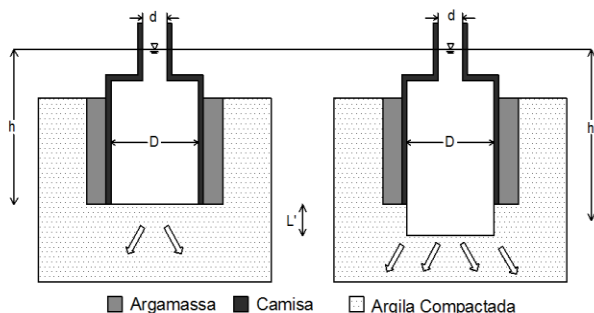


Figura 2 - Ensaio com permeâmetro de Boutwell

3 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios descritos no protocolo experimental do estudo.

3.1 Ensaios de caracterização

Os resultados dos ensaios de caracterização física estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Resultados dos ensaios de peso específico real dos grãos e limites de Atterberg

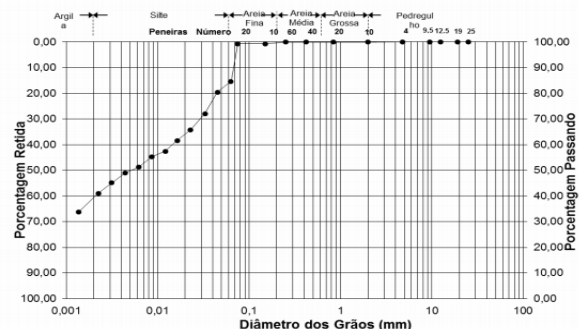
Identificação	Peso específico real dos grãos (kN/m^3)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
AM 1	26,87	53	30	23

A determinação do peso específico real dos grãos da amostra deformada apresentou um resultado dentro do esperado, de acordo com a mineralogia do material. A amostra pode ser considerada altamente plástica, sendo o Índice de Plasticidade maior que 15%. Além disso, é importante salientar que quanto maior este índice, mais compressível é o solo.

A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação com o uso de defloculante e a classificação geotécnica do material pelos sistemas HRB e USCS. A Figura 1 apresenta a curva granulométrica deste solo.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de granulometria e classificação geotécnica dos solos

Identificação		Amostra 01
Frações Granulométricas	Pedregulho	0
	Areia Grossa	0
	Areia Média	1
	Areia Fina	15
	Silte	45
Classificação	Argila	39
	HRB	A-7-5
	USCS	MH



altamente elásticos. Além disso, este material apresentou um valor de Índice de Grupo de 19, que o caracteriza como um material pobre pra utilização em bases e sub-bases de pavimentos. De acordo com o Sistema de Classificação Unificada de Solos (USCS), a amostra foi classificada com MH, um silte elástico.

A determinação dos índices físicos, necessária para o ensaio de permeabilidade em laboratório, está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos índices físicos das amostras indeformadas de solo

	Amostra 01	Amostra 02
Peso específico natural (kN/m ³)	15,99	18,79
Peso específico aparente seco (kN/m ³)	11,76	14,34
Teor de umidade natural (%)	35,92	31,05
Grau de saturação (%)	75,17	95,56
Índice de Vazios	1,284	0,973
Porosidade (%)	56,35	46,61

3.2 Ensaios de permeabilidade

Nesta pesquisa, o ensaio de laboratório utilizado foi o do permeâmetro tipo tubo amostrador, com a utilização de duas amostras indeformadas. Os resultados deste ensaio estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de permeâmetro de parede rígida

Amostra	Teor de umidade (%)	Índice de vazios	Grau de saturação (%)	Permeabilidade média (m/s)
AM-1	35,92	1,284	75,17	$2,146 \times 10^{-6}$
AM-2	31,05	0,873	95,56	$8,242 \times 10^{-9}$

Este tipo de ensaio mede a permeabilidade vertical. Percebe-se que os valores variam entre $8,24 \times 10^{-9}$ m/s e $2,14 \times 10^{-6}$ m/s. Esta diferença pode ter sido causada pela diferença no número de vazios das duas amostras ou por uma possível perturbação da estrutura do solo durante o procedimento de coleta da amostra.

Além disso, cabe salientar que as duas amostras foram coletadas em pontos distintos.

Os resultados do ensaio de infiltrômetro de anel estão apresentados na Tabela 5. A capacidade de infiltração superficial apresentou um valor médio de $3,403 \times 10^{-5}$ m/s. Pinto (2005) encontrou valores de capacidade de infiltração superficial na ordem de 10^{-5} m/s em um estudo realizado com solos para disposição de resíduos na região de Santa Maria/RS. Tais valores estão na mesma ordem de grandeza da permeabilidade horizontal dos Depósitos Fluviais do Arroio Cadena apresentados por Rauber (2008).

Tabela 5 - Resultados do ensaio de infiltrômetro de anel

Ponto	Capacidade de infiltração (cm/s)	Capacidade de infiltração (cm/h)	Capacidade de infiltração média (m/s)
IF-01	$1,84 \times 10^{-3}$	6,63	$3,40 \times 10^{-5}$
IF-02	$2,28 \times 10^{-3}$	8,21	
IF-03	$2,69 \times 10^{-3}$	9,67	
IF-04	$6,81 \times 10^{-3}$	24,50	

Os resultados do ensaio em furo de sondagem estão na Tabela 6. No caso A, o tubo reveste todo o furo e no caso B, o tubo reveste metade do comprimento do furo, conforme descrito anteriormente.

Tabela 6 - Resultados do ensaio em furo de sondagem

Ponto	Caso A Permeabilidade Vertical	Caso B Permeabilidade Horizontal
Altura do filtro (cm)	0	20
Diâmetro do furo (cm)	5	5
Profundidade (m)	0,4	0,4
Valor médio de permeabilidade (m/s)	$1,462 \times 10^{-9}$	$5,641 \times 10^{-9}$
km (m/s)	$2,872 \times 10^{-9}$	
M	1,964	

Para os ensaios do tipo A, a permeabilidade determinada é vertical (kv), enquanto que para os ensaios do tipo B a permeabilidade é predominantemente horizontal (kh). Na média, a permeabilidade horizontal é 3,8 vezes maior

do que a permeabilidade vertical.

De modo a obter-se um valor médio (km) que seja representativo para a camada, devem-se unificar os valores de permeabilidade horizontal e vertical. O fator m é um fator de transformação e através dele podem-se determinar as permeabilidades verticais e horizontais a partir do parâmetro km .

Os ensaios de furo de sondagem resultaram em valores médios na ordem de $2,87 \times 10^{-9} \text{ m/s}$. Ou seja, dentro dos valores de permeabilidade horizontal apresentados por Pinto (2005) e Rauber (2008) para a Formação Santa Maria-Membro Alemoa, com a utilização da técnica do piezômetro escavado.

Os ensaios com piezômetro foram realizados em dois pontos da área estudada. Os resultados deste ensaio estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados do ensaio com a técnica do piezômetro

Ponto	Altura do filtro (cm)	Diâmetro do furo (cm)	Profundidade (m)	Valor médio de permeabilidade (m/s)
PZ-01	30	8,5	0,4	$3,939 \times 10^{-7}$
PZ-02	30	8,5	0,4	$1,584 \times 10^{-7}$

Os valores médios de permeabilidade horizontal encontrados foram na ordem de $2,76 \times 10^{-7} \text{ m/s}$. O PZ-01 apresentou valores 2,5 vezes maiores que o PZ-02. Durante os ensaios, o selo de bentonita do PZ-01 rompeu após a terceira leitura, paralisando o ensaio. Rauber (2008), em ensaios realizados em materiais da Formação Santa Maria (Membro Alemoa), encontrou valores de permeabilidade horizontal na ordem de 10^{-8} a 10^{-9} m/s .

Tabela 8 - Resultados do ensaio com permeâmetro de Boutwell

Ponto	k_1/k_2	m	kh (m/s)	Valor médio de permeabilidade (m/s)
BT-01	1,15	1,3	$2,260 \times 10^{-8}$	$1,337 \times 10^{-8}$
BT-02	2,75	2,5	$3,840 \times 10^{-8}$	$6,144 \times 10^{-9}$

Os resultados dos ensaios com o

permeâmetro de Boutwell estão apresentados na tabela 8.

A permeabilidade apresentada em BT-01 foi da ordem de 10^{-8} m/s , sendo que a permeabilidade horizontal foi 1,7 vezes maior que a vertical. Em BT-02, a permeabilidade apresentada foi da ordem de $3,84 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ a $6,14 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, sendo que a permeabilidade horizontal foi 6,25 vezes maior que a vertical.

Esta diferença entre os resultados dos ensaios pode ser explicada pela complexidade da montagem do ensaio no campo, sendo difícil garantir a limpeza do furo.

3.3 Análise dos resultados

Com a utilização de diferentes metodologias de ensaios para determinar a capacidade de infiltração e permeabilidade do solo, foram encontrados valores que variaram entre $3,40 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ e $8,24 \times 10^{-9} \text{ m/s}$.

No ensaio de permeâmetro de parede rígida, realizado em laboratório, obtiveram-se valores entre $8,24 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ e $2,14 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Foram determinados os índices físicos destas amostras indeformadas, verificando que no corpo de prova mais poroso a permeabilidade foi mais elevada.

Já nos ensaios de campo, obteve-se para o ensaio de infiltrômetro de anel uma capacidade de infiltração média de $3,403 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Este ensaio é muito utilizado na área agrícola para determinar a infiltração superficial de solos para diferentes tipos de cultura. O ensaio de furo de sondagem, que tem como principal vantagem a determinação da permeabilidade vertical e horizontal, gerou valores médios na ordem de $2,87 \times 10^{-9} \text{ m/s}$. No ensaio de piezômetro escavado, técnica de mais fácil montagem, obtiveram-se valores médios de permeabilidade horizontal de $2,76 \times 10^{-7} \text{ m/s}$. Por fim, no ensaio de Boutwell, que permite a determinação da permeabilidade vertical e horizontal, obtiveram-se valores médios de $9,75 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ para a vertical e $3,05 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ para a horizontal.

Todos os valores médios encontrados podem ser considerados de muito baixa ou baixíssima permeabilidade.

4 CONCLUSÕES

Para projetos de aterros sanitários, os ensaios de campo demonstraram serem instrumentos muito úteis e válidos para o estudo da condutividade hidráulica, pois permitem analisar um volume maior de solo. De acordo com Pinto (2005), os ensaios *in situ* tem como vantagem a eliminação dos problemas como amolgamento das amostras indeformadas e a dificuldade de amostragem para solos arenosos. Entretanto, estes ensaios podem apresentar erros devido à falta de precisão nas leituras e variabilidade na temperatura ambiente, que podem ser evitados em laboratório.

De acordo com a NBR 13896- Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação (ABNT, 1997), uma camada impermeabilizante deve ser implantada na base de um aterro sempre que houver predominância no subsolo de material com condutividade hidráulica superior a 5×10^{-7} m/s. Desta forma, levando em consideração apenas esta recomendação, haveria necessidade de uma proteção adicional no aterro sanitário em estudo. Porém, a amostragem utilizada neste estudo é insuficiente para um posicionamento definitivo. Para isso, necessita-se um levantamento mais minucioso da área, com ensaios abrangendo uma maior área do empreendimento.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). *NBR 6508 – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro/RJ
- *NBR 7181- Solo- Análise granulométrica*. Rio de Janeiro/RJ.
- *NBR 6459- Solo- Determinação do limite de liquidez – Método de ensaio*. Rio de Janeiro/RJ.
- *NBR 7180- Solo- Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio*. Rio de Janeiro/RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). *NBR 13896. Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro/RJ
- ABGE. (1996). *Ensaio de permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo*. 3. Ed. São Paulo. Boletim nº 4. 30p.
- Boskov, M.E.G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. Oficina de

Textos. São Paulo/SP.

- Daniel, D.E. (1989). *State-of-the-art: laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils*. Journal of geotechnical Engineering. Philadelphia/USA
- Jucá, J.F.T. (2003). *Disposição Final dos resíduos sólidos no Brasil*. Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre/RS.
- Maciel Filho, C.L. (1977). *Caracterização geológica das formações sedimentares de Santa Maria/RS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro. 123f.
- Pinto, J.S. (2005). *Estudo da condutividade hidráulica de solos para disposição de resíduos sólidos na região de Santa Maria*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. 154p.
- Rauber, A.C.C. (2008). *Diagnóstico ambiental urbano do meio físico de Santa Maria - RS*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 97p.