

ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO E PERMEABILIDADE: ESTUDO COMPARATIVO DA SUA REPRESENTATIVIDADE NA AFERIÇÃO DA EFICÁCIA DA IMPERMEABILIZAÇÃO DAS CAMADAS DE COBERTURA DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO DE CARVÃO

Denise Olimpio Ugioni GARCIA¹; Antônio Sílvia Jornada KREBS²; Luciane GARAVAGLIA³; Roberto ROMANO NETO⁴; Luiz Gonzaga Borges de MEDEIROS⁵; André Aléssio BERTI⁶; Renata Scheffer CARDOSO⁷;

¹SATC, denise.garcia@satc.edu.br; ²SATC, asjkrebs@gamil.com; ³SATC, luciane.garavaglia@satc.edu.br, ⁴SATC, roberto.romano@satc.edu.br, ⁵SATC, luiz.medeiros@satc.edu.br, ⁶andre_alessio@hotmail.com, ⁷renata.scheffer@hotmail.com

RESUMO

Na região sul de Santa Catarina ocorrem áreas impactadas pela mineração de carvão decorrentes da exposição desordenada de depósitos de rejeitos e estéreis com potencial de geração de drenagem ácida de mina (DAM). Essas áreas precisam ser hidráulica e isoladas por uma camada de baixa permeabilidade construída com materiais argilosos ou siltico-argilosos compactados para impedir a formação de DAM que pode contaminar os recursos hídrico. As jazidas utilizadas para materiais de empréstimo existentes próximos às áreas impactadas da bacia Carbonífera do Sul de Santa Catarina foram analisadas quanto à capacidade de impermeabilização das litologias utilizadas nos trabalhos de recuperação das áreas impactadas. Os estudos foram desenvolvidos pelo Centro Tecnológico de Carvão Limpo (CTCL) da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC). Do ponto de vista geológico constatou-se que quase todas as jazidas estão relacionadas aos intervalos estratigráficos correspondentes ao terço superior da Formação Rio Bonito e Formação Palermo (terço superior, médio e inferior). Todos estes intervalos estratigráficos são constituídos por siltitos com algumas intercalações de arenitos finos. Somente uma jazida está relacionada ao manto de alteração de rochas graníticas (Granito Imaruí-Capivari). Em linhas gerais e independente do contexto geológico, todas as amostras coletadas nas jazidas estudadas apresentaram materiais de baixa permeabilidade (10^{-5} a 10^{-7} cm/s) em amostras moldadas no laboratório. Nos estudos realizados, conclui-se que o melhor método de aferição da permeabilidade da camada compactada é o ensaio de densidade *in situ* em razão de sua eficiência em demonstrar se o material utilizado atingiu o índice de compactação prevista no projeto de recuperação.

Palavras-chave: Recuperação de área degradada. Geotecnia. Mineração de Carvão.

ABSTRACT

In the southern region of Santa Catarina there are sites impacted by coal mining activity resulting from the disordered exposure of tailings and barren deposits with high content of sulfur minerals what make them potentially mine acid drainage (AMD) sources for rivers and groundwater pollution. These sites need to be hydraulically confined by a low permeability layer in order to prevent the AMD. The deposits of low permeability materials shows a profile compund by minerals of clayey or siltic-clayey composition. The Clean Coal Technological Center (CTCL) of the Beneficial Association of the Carboniferous Industry of Santa Catarina (SATC) carried out geological and geotechnical characterization studies of the deposits, testing the materials effectiveness as impervious media on reclaimed or under reclamation areas. The results were significant contributions to the knowledge of geology and the capacity for water proofing of the studied materials. In terms of geology, the stratigraphic intervals corresponding to the upper third of the Rio Bonito Formation and Palermo Formation (upper, middle and lower third) were recognized as composed by siltstones or shales, eventually showing fine sandstones interbeddings. Only one deposit is profiled by the residual soil of granite rocks (Imaruí-Capivari Granite). All samples collected from deposits are compounded by low permeability (10^{-5} to 10^{-7} cm/s) and can be used as a barrier of compacted layer to water infiltration. It was also concluded that the best method of measuring the permeability of the compacted layer is the *in situ* density test because of its efficiency in demonstrating if the material has reached the compaction standard predicted in the reclamation project.

Key-Words: reclamation of impacted areas, geotechnics, coal mining

1 INTRODUÇÃO

A recuperação das áreas impactadas pela atividade de mineração de carvão em Santa Catarina deve ser realizada considerando os critérios técnicos elaborados pelo Grupo Técnico de Assessoramento à Execução da Sentença (GTA), conforme Brasil (2009), que, especificamente, com relação à cobertura, estabelece:

“[...] 4.3. Os rejeitos e/ou estéreis não inertes deverão ser removidos ou recobertos. Caso recobertos, a espessura mínima dessa cobertura deverá resistir a ações antrópicas e/ou naturais, atendendo a função de impermeabilização proposta. Para o dimensionamento da camada impermeabilizante deverá ser considerado o uso futuro da área. Ensaio de permeabilidade deverão comprovar a eficiência da impermeabilização, contemplando cobertura e taludes, na razão mínima de um ensaio por hectare”.

A principal técnica empregada nas áreas em processo de recuperação na região carbonífera para aferir a eficácia da camada de cobertura de baixa permeabilidade se fundamenta nos ensaios de infiltração *in situ* com cilindros concêntricos.

A norma NBR 13.896 (ABNT, 1997), que estabelece critérios para projetos, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, com o objetivo de proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como, os operadores destas instalações e populações vizinhas, define o coeficiente de permeabilidade, como o parâmetro a ser aferido em campo para atestar a qualidade da camada de proteção.

No entanto nenhum método foi definido, especificamente para a avaliação da eficácia da camada de baixa permeabilidade nas áreas em processo de recuperação de passivos ambientais da mineração de carvão. Diante da necessidade da definição do método de aferição da camada de cobertura compactada de baixa permeabilidade, assim como de avaliar a aplicabilidade dos métodos e resultados da metodologia proposta pela CIENTEC de Viçosa (2012), com a norma NBR 13.292 (ABNT, 1995) foram desenvolvidos estudos pelo CTCL.

Os estudos objetivam contribuir com metodologia de análise de qualidade da recuperação ambiental no que se refere a sua capacidade de isolar hidraulicamente os materiais com potencial de geração de drenagem ácida de mina (DAM), especificamente relacionadas aos materiais de

empréstimo utilizados na construção da camada de proteção de baixa permeabilidade. Os resultados dos estudos demonstram significativas contribuições ao conhecimento da qualidade geológico-geotécnica dos materiais de empréstimo disponíveis próximos às áreas recuperadas ou em processo de recuperação e indicam a melhor metodologia de aferição.

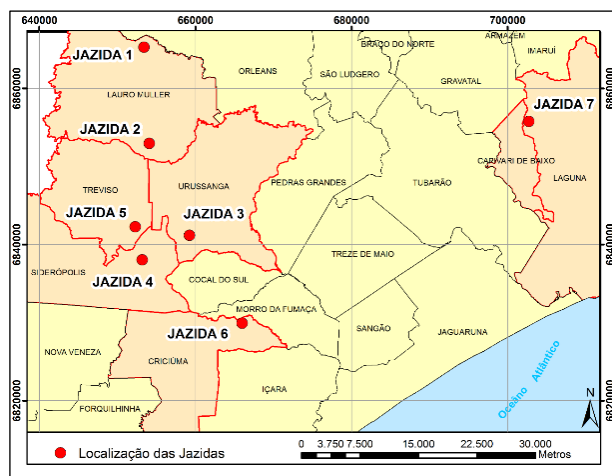
2 METODOLOGIA

Para uma amostragem representativa foram escolhidas sete jazidas abrangendo todos os sítios geológicos de onde vêm sendo extraídos os materiais de empréstimo utilizados para a construção das camadas de baixa permeabilidade nas áreas em processo de recuperação.

Nas regiões próximas às áreas em processo de recuperação na bacia carbonífera existem, principalmente, 4 tipos diferentes de materiais argilosos que estão, estratigraficamente, associados às formações Palermo e Rio Bonito e ao Granito Imaruí-Capivari, jazida 01 localizada em Rio Capivaras no Município de Lauro Müller; jazida 02 localizada em Rio Queimado no município de Lauro Müller; jazida 03 localizada em Rio Deserto no município de Urussanga; jazida 04 localizada em Rio Fiorita no município de Siderópolis; jazida 05 localizada em Rio Morosini no município de Treviso; jazida 06 localizada na Linha Batista no município de Criciúma e jazida 07 localizada no município Pescaria Brava e Laguna (Figura 1). Para cada jazida estudada foi identificada a área em processo de recuperação, a qual utilizou o material oriundo daquela jazida para a construção da camada de baixa permeabilidade.

De maneira geral, o sistema de camada de baixa permeabilidade é construído por materiais de empréstimo de diferentes propriedades, oriundos da camada de solo formada por processos de alteração residual de siltitos arenosos e de rocha granítica das formações geológicas citadas.

Figura 1 – Localização das 7 jazidas estudadas na Bacia Carbonífera de Santa Catarina.



O objetivo principal da camada de baixa permeabilidade é minimizar/encerrar a geração de drenagem ácida, através da formação de uma barreira, que impeça o contato do oxigênio com a água, oriunda da precipitação com o material contaminante, reduzindo a contaminação dos recursos hídricos.

Após a escolha e identificação das jazidas foram coletadas amostras para a classificação e análise das mesmas. Para cada amostra de material coletado das jazidas foi realizada a determinação granulometria, limite de liquidez e plasticidade, ensaio de Proctor normal e, por último, foi moldado um corpo de prova com o material da jazida, com 95% do Proctor e realizado o ensaio de permeabilidade em laboratório.

Nas áreas em processo de recuperação foi determinada uma malha amostral de aproximadamente um ponto por hectare de área, sendo que em cada ponto foi realizado um furo com trado manual para a determinação do perfil da camada impermeabilizante e, adjacente ao trado, foi realizado um ensaio de infiltração *in situ* com anéis concêntricos e um ensaio de densidade *in situ*, além da coleta de uma amostra indeformada para o ensaio de permeabilidade, como ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Ensaios realizados em campo.



Após a realização dos ensaios de campo e laboratoriais das amostras coletadas nas jazidas e das áreas em processo de recuperação ambiental, os dados foram compilados para que, assim, fosse possível avaliar a qualidade dos materiais disponíveis na região para utilizar como empréstimo e sua aplicabilidade como camada impermeabilizante em áreas em processo de recuperação ambiental.

Para a classificação dos resultados dos ensaios de permeabilidade de carga constante, o valor do coeficiente de permeabilidade (k) encontrado para cada amostra será utilizado a Tabela 1 indicada por Soares; Pinheiro; Tavares (2006).

Tabela 1 – Classificação do solo a partir do seu coeficiente de permeabilidade (k).

Permeabilidade		k (m/s)
Solos permeáveis	Alta	$>10^{-3}$
	Alta	10^{-3} a 10^{-5}
	Baixa	10^{-5} a 10^{-7}
Solo de VIB baixa	Muito baixa	10^{-7} a 10^{-9}
	Baixíssima	$<10^{-9}$

Fonte: Soares; Pinheiro; Tavares (2006).

Nos resultados dos ensaios de infiltração com cilindros concêntricos realizados *in situ*, são obtidos o valor da Velocidade de Infiltração Básica (VIB) da camada compactada, e classificados segundo o critério da CIENTEC de Viçosa (2012) (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação do solo a partir de sua VIB.

Tipos de solo	VIB (cm/h)
Solo de VIB muito alta	> 3,0
Solo de VIB alta	1,5 - 3,0
Solo de VIB média	0,5 - 1,5
Solo de VIB baixa	< 0,5

Fonte: CIENTEC de Viçosa (2012).

3 RESULTADOS

Após todos os ensaios de campo realizados e todos os ensaios de laboratório concluídos os dados foram compilados com o objetivo de avaliar o material utilizado, para a construção da camada de baixa permeabilidade, com os resultados encontrados em campo após a construção da camada ensaiada.

O estudo iniciou com a amostragem da jazida utilizada para material de empréstimo, e posteriormente o estudo teve sequência na área em processo de recuperação ambiental. Os resultados dos ensaios de cada jazida e sua respectiva área recuperada foram tabelados para posterior avaliação.

A Tabela 3 mostra o número de amostra para cada uma das sete jazidas e a amostragem nas áreas em processo de recuperação.

Tabela 3 – Quantidade de ensaios realizados.

Localização	Número de amostras coletadas nas jazidas	Número de amostragem das áreas recuperadas
Jazida 1	4	18
Jazida 2	3	4
Jazida 3	2	2
Jazida 4	2	4
Jazida 5	2	20
Jazida 6	3	*
Jazida 7	4	5

3.1 RESULTADOS REFERENTES À JAZIDA 01 E À ÁREA RECUPERADA ZONA 4

Os trabalhos realizados para amostrar a região de Lauro Müller/SC ocorreram na localidade de Capivaras Alta.

O material desta jazida é constituído por siltitos e arenitos finos sílticos que constituem um espesso pacote no terço superior da Formação Rio Bonito. Os valores de densidade encontrados nas amostras da jazida 1 variaram de 1,42 g/cm³ até 1,71 g/cm³, com índice de plasticidade (IP) que variou de 9% a 36%. Sabe-se que quanto mais alto o valor IP, mais plástico é o material.

Com relação à eficiência da cobertura de baixa permeabilidade da área em processo de recuperação denominada Zona 4, dos 18 pontos ensaiados somente 5 não alcançaram a permeabilidade de 10⁻⁷ cm/s conforme recomenda ZETA-IESA (1985), 9 pontos não atingiram densidade máxima de compactação. Alguns pontos poderiam ter sua permeabilidade melhorada já que não atingiram a densidade máxima.

Classificando os pontos amostrados da área Zona 4 segundo o resultado da Velocidade de Infiltração Básica (VIB), todos os 18 pontos possuem baixa VIB. Já, para os ensaios de permeabilidade (k) todos os resultados classificaram-se como solo de muito baixa permeabilidade.

Considerando os resultados obtidos nos ensaios de laboratório, bem como nos ensaios realizados em campo pode-se concluir que o material de empréstimo obtido na jazida 01 (Figura 3) apresenta características favoráveis a utilização em coberturas de baixa permeabilidade.

Figura 3 – Detalhe do local de coleta de uma amostra na jazida 01.



3.2 RESULTADOS REFERENTES À JAZIDA 02 E À ÁREA RECUPERADA ÁREA 15

Os trabalhos realizados para amostrar a outra região de Lauro Müller/SC ocorreram na localidade de Rio Queimado (Figura 4).

Figura 4 – Amostragem de canal em perfil de solo da Formação Rio Bonito na jazida 02.



O material desta jazida é constituído por siltitos e siltitos arenosos que ocorrem na base da Formação Palermo e no topo da Formação Rio Bonito.

Os valores de densidade encontrados nas amostras da jazida 02 variaram de 1,52 g/cm³ até 1,58 g/cm³, com índice de plasticidade (IP) que variou de 13% a 18%.

Na cobertura de baixa permeabilidade da área em processo de recuperação em que foi utilizado o material de empréstimo da jazida 02, dos 4 pontos ensaiados dois atingiram a permeabilidade de 10⁻⁷ cm/s, um não permeou após 96h de ensaio e outro ficou acima do valor de 10⁻⁷ cm/s.

Nenhum dos pontos atingiram densidade máxima de compactação obtida em laboratório nas amostras moldadas, sugerindo que este material pode apresentar permeabilidade menor se for compactado na umidade ótima, assim obtendo a densidade máxima.

Classificando os pontos segundo o resultado de infiltração (VIB), todos os 4 pontos possuem baixa velocidade de infiltração.

Para os ensaios de permeabilidade (k) três pontos classificaram-se como solo de muito baixa permeabilidade segundo a Tabela 1, apenas um classifica-se como solo de baixa permeabilidade.

3.3 RESULTADOS REFERENTES À JAZIDA 03 E À ÁREA RECUPERADA RIO DESERTO

Os trabalhos realizados para amostrar o material de empréstimo da região de Urussanga/SC ocorreram na localidade de Rio Deserto (Figura 5).

Figura 5 – Amostragem de canal em perfil de solo da Formação Rio Bonito na jazida 03.



O material desta jazida é constituído por siltito e siltitos arenosos que ocorrem na base da Formação Palermo.

Os valores de densidade encontrados nas amostras da jazida 03 variaram de 1,54 g/cm³ até 1,64 g/cm³, com índice de plasticidade (IP) que variou de 16% a 17%.

Com relação a eficiência da cobertura da área em processo de recuperação, 2 pontos ensaiados atingiram a permeabilidade de 10⁻⁷ cm/s, mesmo que ambos não atingiram a densidade máxima. Este fato demonstra a variação do material, pois as amostras moldadas em laboratório coletadas na jazida 03, com Proctor de 95%, apresentou uma permeabilidade menor que 10⁻⁶ cm/s.

Classificando os pontos segundo o resultado de infiltração (VIB), todos os quatro pontos possuem baixa velocidade de infiltração conforme critério da CIENTEC de Viçosa (2012).

Para os ensaios de permeabilidade (k) todos os resultados classificaram-se como solo de muito baixa permeabilidade.

3.4 RESULTADOS REFERENTES À JAZIDA 04 E À ÁREA RECUPERADA DA UNIDADE DE BENEFICIAMENTO RIO FIORITA

Os trabalhos realizados para amostrar o material de empréstimo da região de Siderópolis/SC ocorreram na localidade de Rio Fiorita (Figura 6).

Figura 6 – Amostragem em perfil de solo da Formação Palermo na jazida 04.



O material desta jazida é constituído por siltitos e arenitos finos que constituem o terço inferior e médio da Formação Palermo.

Os valores de densidade encontrados nas amostras da jazida 04 variaram pouco de 1,64 g/cm³ a 1,68 g/cm³, com índice de plasticidade (IP) de 15%. Uma amostra não foi possível executar o ensaio de limite de plasticidade, assim não obtendo o índice de plasticidade, sendo que o laudo indica material não plástico.

Com relação à eficiência da cobertura da área em processo de recuperação, em que foi utilizado este material de empréstimo, dos 4 pontos ensaiados, somente um atingiu a permeabilidade de 10⁻⁷ cm/s, e todos os pontos ficaram bem abaixo do valor de 1,64 g/cm³ encontrado no material da jazida 04.

3.5 RESULTADOS REFERENTES À JAZIDA 05 E À ÁREA RECUPERADA RIO MOROSINI

Os trabalhos realizados para amostrar o material de empréstimo da região de Treviso/SC ocorreram na localidade de Rio Morosini (Figura 7).

Figura 7 – Vista geral da jazida 05.



O material desta jazida é constituído por siltitos e siltitos arenosos que constituem o terço médio da Formação Palermo.

Os valores de densidade encontrados nas amostras da jazida 05 variaram de 1,57 g/cm³ até 1,61 g/cm³, com índice de plasticidade (IP) que variou de 5% a 14%.

Com relação à eficiência da cobertura da área em processo de recuperação, em que foi utilizado este material de empréstimo, dos 20 pontos ensaiados, somente dois pontos atingiram a permeabilidade de 10⁻⁷ cm/s, quatro pontos não permearam após 96 h de ensaios, e todos ficaram abaixo do valor de 1,57 g/cm³ encontrado no material da jazida 05. Com relação aos valores de infiltração encontrados, a maioria atingiu o 10⁻⁷ cm/s, somente quatro pontos não atingiram a infiltração recomendada por ZETA-IESA (1985).

Classificando os pontos segundo o resultado de infiltração (VIB), a maioria dos pontos possuem baixa velocidade de infiltração, dois pontos possuem média velocidade de infiltração e um possui alta velocidade de infiltração.

Para os ensaios de permeabilidade (k) a maioria dos pontos classificaram-se como solo de muito baixa permeabilidade, três pontos classificam como solo de baixa permeabilidade e dois como solo de alta permeabilidade.

3.6 RESULTADOS REFERENTES À JAZIDA 06

Os trabalhos realizados para amostrar o material de empréstimo da região de Criciúma/SC ocorreram na localidade de Linha Batista (Figura 8).

Figura 8 – Vista geral da jazida 06.



O material desta jazida é constituído por siltitos, siltitos arenosos e arenitos finos que constituem o terço inferior da Formação Palermo e topo da Formação Rio Bonito.

O material de empréstimo da jazida 06 foi utilizado na construção da camada de baixa permeabilidade nas obras de recuperação contratada pela Gaspetro, em uma área situada na localidade de Sangão. Na referida área não foi autorizado os ensaios de campo, assim, não foi possível o cruzamento das informações obtidas na jazida 06 com os resultados obtidos na camada de baixa permeabilidade.

3.7 RESULTADOS REFERENTES À JAZIDA 07 E À ÁREA RECUPERADA ESTIVA DOS PREGOS

Os trabalhos realizados para amostrar o material de empréstimo da região de Pescaria Brava/SC e Capivari de Baixo/SC (Figura 9).

Figura 9 – Vista geral da jazida 07.



O material desta jazida é constituído por manto de alteração (saibro) de rochas graníticas – Granito Imaruí – Capivari.

Os valores de densidade encontrados nas amostras da jazida 07 variaram de 1,55 g/cm³ até 1,79 g/cm³, com índice de plasticidade (IP) que variou de 7% a 23%.

Com relação à eficiência da cobertura da área em processo de recuperação, em que foi utilizado este material de empréstimo, dos 5 pontos ensaiados, dois pontos atingiram a permeabilidade de 10⁻⁷ cm/s, três pontos não atingiram a permeabilidade recomendada por ZETA-IESA (1985), e quatro ficaram abaixo do valor de densidade de 1,55 g/cm³ encontrado no material da jazida.

Classificando os pontos segundo o resultado de infiltração (VIB), todos os pontos possuem baixa velocidade de infiltração.

Para os ensaios de permeabilidade (k) todos os pontos classificaram-se como solo de muito baixa permeabilidade.

4 CONCLUSÃO

Do ponto de vista geológico constatou-se que quase todas as jazidas estão relacionadas aos intervalos estratigráficos correspondentes ao terço superior da Formação Rio Bonito e Formação Palermo (terço superior, médio e inferior). Todos estes intervalos estratigráficos são constituídos por siltitos com algumas intercalações de arenitos finos e/ou folhelhos. Somente a jazida 07 (Capivari de Baixo) está relacionada ao manto de alteração de rochas graníticas (Granito Imaruí-Capivari).

A interpretação dos resultados laboratoriais, bem como o contexto geológico, permite verificar que as jazidas 01 e 02, ambas situadas no município de Lauro Müller/SC, apresentam características geotécnicas semelhantes e estão relacionadas ao intervalo estratigráfico correspondente ao terço superior da Formação Rio Bonito e base da Formação Palermo, onde ocorre um espesso pacote de siltitos, siltitos arenosos e, no caso da Formação Rio Bonito arenitos finos. De uma maneira geral, as técnicas utilizadas para compactação da camada de baixa permeabilidade, constatou-se que os resultados obtidos mostraram uma permeabilidade de 10⁻⁷ cm/s, com apenas uma exceção. Esta variação de resultado pode estar relacionada ao

intervalo estratigráfico em que foi coletada a amostra 01 da jazida 01, a qual apresentou resultado de permeabilidade moldada superior a 10^{-7} cm/s.

As jazidas 01 e 02, apresentaram os maiores índices de plasticidade com mediana de 18% e o maior percentual de fração granulométrica abaixo de 0,074 mm dentre das jazidas. Esses resultados têm relação direta com a textura do perfil litológico encontrado na zona de alteração do perfil litológico, no qual predominam camadas de siltitos e siltitos argilosos. As amostras dessas jazidas apresentaram mediana de densidade de $1,57 \text{ g/cm}^3$ nos ensaios de Proctor normal indicando boa capacidade de compactação e mediana de $4,5 \times 10^{-7}$ cm/s nos ensaios de permeabilidade realizados com amostras moldadas. Nas áreas em processo de recuperação, considerando-se a mediana dos resultados, os materiais dessas jazidas foram adensados com 86,9% do Proctor normal e apresentaram coeficiente de permeabilidade de $2,8 \times 10^{-7}$ cm/s.

Com relação às jazidas 03, 04 e 05, constatou-se que as mesmas se localizam em diferentes intervalos estratigráficos da Formação Palermo. Sabe-se que este condicionamento influencia diretamente os resultados da caracterização geotécnica e por consequência na eficiência da cobertura aplicada na área em processo de recuperação.

As jazidas 03 e 05 estão situadas no terço médio e superior dessa formação enquanto a jazida 04 encontra-se em seu terço inferior. Do ponto de vista litológico, predomina no intervalo inferior camadas de arenitos, arenitos silticos e, de maneira subordinada, siltitos arenosos enquanto nos intervalos médio e superior predominam as camadas de siltitos e siltitos arenosos. Com relação ao índice de plasticidade, os resultados obtidos indicaram que existem variações acentuadas de um material para o outro, ocorrendo materiais com índice de plasticidade de 17% até materiais não plásticos. A razão disso poderá não estar relacionada com a granulometria, uma vez que a fração menor que 0,074 mm que inclui partículas de tamanho silte e argila apresentou variações de 49% a 53%, admitindo-se, assim, que as diferenças encontradas nos valores de índices de plasticidade podem estar relacionadas com a estrutura das argilas. No que se refere ao coeficiente de permeabilidade e considerando-se os resultados médios, verifica-se que também há uma relação direta com o contexto geológico-estratigráfico, pois as amostras coletadas no terço médio e superior da

Formação Palermo apresentaram permeabilidade entre 10^{-6} e 10^{-7} cm/s, enquanto as amostras do terço inferior de 10^{-5} cm/s.

Nas áreas recuperadas com materiais provenientes da Formação Palermo, os coeficientes de permeabilidade indicam variações nos métodos utilizados para compactação. A mediana obtida na área recuperada com materiais da jazida 05 mostra resultado de permeabilidade de $4,8 \times 10^{-6}$ cm/s com grau de compactação de 84,5% do Proctor normal na amostra moldada cuja permeabilidade apresentou $7,7 \times 10^{-7}$ cm/s. Na área recuperada com materiais da jazida 03, a mediana do coeficiente de permeabilidade apresentou resultado de $2,1 \times 10^{-6}$ cm/s com grau de compactação de 90,5% do Proctor normal da amostra moldada cuja permeabilidade apresentou $2,5 \times 10^{-6}$ cm/s, evidenciando que nas áreas recuperadas onde houve maior adensamento dos materiais, obtiveram-se resultados médios muito próximos das amostras moldadas.

Para a jazida 04, os resultados obtidos ficaram acima do valor de 10^{-7} cm/s, mesmo nas amostras moldadas com grau de compactação superior a 95%. Estas características indicam que o material de empréstimos desta jazida deve ser misturado com materiais de outras jazidas de modo que uma permeabilidade mais baixa seja alcançada.

Os materiais de empréstimos da jazida 07 relacionados com o manto de alteração do Granito Imaruí-Capivari apresentaram características geotécnicas de materiais com média plasticidade (IP=15) e de elevada capacidade de adensamento, haja vista a mediana da densidade máxima obtida nos ensaios de Proctor normal igual a $1,7 \text{ g/cm}^3$. Em média, somente 25% das amostras apresentaram partículas menores que 0,074 mm nos ensaios granulométricos. Isso pode ser explicado pelo fato de que a fração fina é constituída, principalmente, por argilas resultantes do intemperismo físico-químico dos minerais tais como feldspatos, sericita, epidoto e micas que ocorrem no Granito Imaruí-Capivari. As argilas formam uma matriz que preenche os espaços intergranulares das demais frações granulométricas formando uma camada de baixa permeabilidade após a compactação.

Na área recuperada com os materiais extraídos do manto de alteração do Granito Imaruí-Capivari, considerando-se a mediana dos resultados, o coeficiente de permeabilidade atingiu o valor de $2,0 \times 10^{-6}$ cm/s com densidade correspondente a 84,9%

do Proctor normal das amostras moldadas cuja permeabilidade atingiu mediana de $1,5 \times 10^{-6}$ cm/s, evidenciando, que mesmo não tendo sido empregada maior energia de compactação na formação da camada protetora na área recuperada com esses materiais, foram obtidos resultado semelhante à mediana do coeficiente de permeabilidade das amostras moldadas.

Em linhas gerais e independente do contexto geológico, todas as amostras coletadas nas jazidas estudadas de acordo com a classificação de Soares; Pinheiro e Tavares (2006) apresentaram materiais de baixa permeabilidade (10^{-5} e 10^{-7} cm/s) em amostras moldadas. Esses materiais quando compactados na área recuperada com densidade de pelo menos 85% do Proctor normal obtiveram a mesma classificação, porém, ficou evidenciado nos estudos que no caso da aplicação das técnicas de compactação os resultados poderiam chegar a coeficientes médios de permeabilidade ainda menores.

No que se refere ao método de aferição da camada de baixa permeabilidade, no questionamento entre ensaio de permeabilidade ou ensaio de infiltração *in situ*, já é sabido que cada ensaio gera um valor distinto, não podendo ser convertido na mesma unidade e comparados. O ensaio de infiltração *in situ* (cilindros concêntricos) tem vantagem e desvantagem, a vantagem seria de que a área amostrada é maior, em relação ao ensaio de permeabilidade, e que o ensaio é realizado sobre toda a camada de proteção (vegetação + solo construído + camada compactada) e o resultado do ensaio é conhecido no mesmo dia. A desvantagem seria de que o resultado gerado não é o coeficiente (parâmetro) utilizado para aferir a camada compactada, o resultado deste ensaio é a velocidade de infiltração básica (VIB), em que a água entra no solo, método este utilizado para aplicar as técnicas de irrigação.

Para o ensaio de permeabilidade (em laboratório), o mesmo obtém o coeficiente “k”, o qual é o valor utilizado para aferir a permeabilidade da camada compactada. Porém, tem a desvantagem de amostrar apenas a camada em pequena escala, assim, as camadas superiores (vegetação + solo construído) ficam excluídas no que se refere a barreira capilar. Durante a coleta da amostra indeformada, por mais que se tenha cuidado, existe o risco de compactar ainda mais a amostra, pois a mesma é extraída com trado tipo *Uhland*, que é cravado com golpes sobre a camada ensaiada. A

amostra coletada é transportada para o laboratório e moldada em um permeâmetro, sendo que, em alguns casos, são necessários quatro dias (96h) de ensaio para conseguir o resultado de permeabilidade naquela amostra. Também é possível que após as 96 h de ensaio não consiga os resultados, pois a amostra não satura. Em algumas amostras para saturar é necessário a utilização de bomba para forçar a entrada de água na amostra ensaiada, na maioria dos casos, o corpo de prova é destruído. Este método forçado gera uma condição não natural de entrada de água através da aplicação de pressão d'água.

Com relação a aferição da permeabilidade da camada compactada, foi verificado nesta pesquisa que deve ser ensaiado a densidade do material compactado, pois aplicando as técnicas de engenharia para controle da compactação da camada, atinge-se a capacidade total de impermeabilização do material utilizado como ficou demonstrado nos estudos realizados. Para que isso seja possível é necessário que durante a pesquisa do material da jazida seja realizado ensaios de caracterização (granulometria, LL, LP, IP e Proctor), possibilitando a aferição da densidade encontrada em campo com a densidade máxima do material da jazida.

Para suprir a necessidade de conhecer a permeabilidade do material coletado sugere-se que molde uma amostra com uma certa porcentagem de compactação (estipulada em projeto) e realize o ensaio de permeabilidade, caso semelhante realizado nesta pesquisa.

Ficou constatado nos estudos que melhores resultados na construção da camada impermeabilizante podem ser alcançados, selecionando e misturando o material (*blend*) e utilizando as técnicas de engenharia para a sua compactação.

5 REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1988.

BRASIL. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Processo nº 2000.72.04.002543-9. Autor: Ministério Público Federal. Réu: Nova Próspera Mineração S.A. e outros. Recuperação dos

passivos ambientais decorrentes da mineração de carvão no sul do Estado de Santa Catarina. **Sétimo relatório de monitoramento dos indicadores ambientais.** Criciúma, 2013.

CIENTEC Viçosa. **Infiltração da água no solo.** Disponível em: <http://www.cientec.net/cientec/InformacoesTecnicas_Irriga/Solo_Infiltracao.asp> Acesso em: 21/05/2010.

SOARES, J. M. D.; PINHEIRO, R. J. B.; TAVARES, I. S. **Notas de aula mecânica dos solos.** Santa Maria. 2006. Disponível em: <http://www.ufsm.br/engcivil/mecanica_dos_solos.htm> Acesso em 10 de dezembro de 2014.

ZETA/IESA. **Projeto Preservação do Meio Ambiente:** Relatório Descritivo e Justificativo Depósitos de Rejeitos Sólidos. Disponível Cedric/CTCL Criciúma, 1985