

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

NATALIE ALMEIDA PÍCOLI

**ANÁLISES DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE PERMEABILIDADE E
INFILTRAÇÃO DE SOLOS ARGILOSOS UTILIZADOS PARA REABILITAÇÃO DE
ÁREAS DEGRADADAS**

CRICIÚMA

2014

NATALIE ALMEIDA PÍCOLI

**ANÁLISES DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE PERMEABILIDADE E
INFILTRAÇÃO DE SOLOS ARGILOSOS UTILIZADOS PARA REABILITAÇÃO DE
ÁREAS DEGRADADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado para obtenção do grau de Engenheira Ambiental no curso de Engenharia Ambiental da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientador: Prof. M.Sc Sérgio Luciano Galatto

CRICIÚMA

2014

NATALIE ALMEIDA PÍCOLI

**ANÁLISES DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE PERMEABILIDADE E
INFILTRAÇÃO DE SOLOS ARGILOSOS UTILIZADOS PARA REABILITAÇÃO DE
ÁREAS DEGRADADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do Grau de Engenharia Ambiental, no Curso de Engenharia Ambiental da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, com Linha de Pesquisa em Restauração de Ambientes Alterados e Recuperação de Áreas Degradadas

Criciúma, 27 de novembro de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Sérgio Luciano Galatto - Mestre - (UNESC) - Orientador

Prof. Norton Ferreira Feil - Doutor - (UNESC)

Gustavo Simão - Mestrando - (UNESC)

A Deus e a minha família.

AGRADECIMENTOS

A **Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC** por toda estrutura e conhecimento passado através do corpo docente do meu curso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. **Sérgio Luciano Galatto** por ter abraçado a proposta junto comigo e por toda a dedicação e contribuição ao trabalho realizado.

A **Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina - SATC** pela oportunidade e apoio durante o período de realização do estágio.

A minha supervisora de campo **Denise Olímpio Ugione Garcia** pela oportunidade de trabalhar com ela e por toda a contribuição com a realização do meu trabalho de conclusão de curso.

A minha grande amiga **Alexsandra Gleci Bernardino** que tem participação direta em toda a minha trajetória acadêmica, pelo apoio em todas as horas e pela ajuda na elaboração deste trabalho.

A **Família Bernardino** a qual considero uma segunda família, pela enorme paciência, prazer em ajudar e pela contribuição neste trabalho.

Aos meus irmãos, **Franco Pícoli** e **Emanuel Almeida Pícoli** por todo o incentivo e apoio durante o processo de graduação.

Aos meus pais, **Janete Pícoli** e **Altair Pícoli** por serem os responsáveis pelo cumprimento da minha caminhada.

A **Deus**, por ter-me permitido chegar até aqui.

“Se Deus não existisse seria preciso inventá-lo.”

Voltaire

RESUMO

A atividade mineira é realizada nos municípios da região sul de Santa Catarina desde a década de 40. Desde então, os municípios compreendidos dentro os limites da Bacia Carbonífera Catarinense foram acumulando problemas ambientais associados aos impactos negativos causados pela extração e beneficiamento de carvão. Dos principais problemas associados à atividade mineira destaca-se a geração da Drenagem Ácida de Minas (DAM). A DAM é o resultado da interação entre os sulfetos presentes no rejeito do minério com água e oxigênio, que através de oxidação natural geram efluentes de baixo pH, elevada acidez e altas concentrações de metais e sulfatos. A aplicação de uma camada de baixa permeabilidade sobre os rejeitos se faz importante em projetos de reabilitação de áreas impactadas pela mineração visando o isolamento dos sulfetos às ações intempéricas e a prevenção da geração da DAM. Visto isso, pode-se dizer que a avaliação da eficiência das camadas de baixa permeabilidade em áreas em processo de recuperação ambiental pelas atividades de mineração de carvão é necessária para avaliar a eficiência da reabilitação das áreas já que da camada argilosa depende fundamentalmente a impermeabilização dos materiais contaminantes da água e do solo. Este trabalho buscou avaliar a eficiência da camada de baixa permeabilidade de uma área de estudo de 19 ha representativa de uma área em processo de reabilitação ambiental impactada pelo depósito de rejeitos de carvão no município de Lauro Müller – SC a partir da aplicação e comparação de metodologias de análise do solo de campo e de laboratório. Para o atendimento do objetivo geral foram coletadas 04 amostras de material argiloso utilizado na cobertura dos rejeitos da área de estudo nas quais foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica. Através de ensaios de campo e de laboratório pode-se mensurar a velocidade de infiltração e a permeabilidade do solo. A investigação da permeabilidade do solo se deu com a aplicação de três metodologias, que compreenderam testes de permeabilidade de campo, testes de permeabilidade de laboratório com permeômetros a partir de amostra moldada com o material proveniente da jazida e indeformada com o material extraído da cobertura do solo da área de estudo e teste de infiltração com cilindros concêntricos. Os resultados das análises indicam que as condições em que o solo se encontra na área de estudo estão bem próximas das ideais definidas em laboratório com coeficientes de permeabilidade médios compreendidos entre $8,85E-07$ e $8,50E-08$, assim como a velocidade de infiltração cujo resultado se apresenta com valor baixo de $2,77778E-05$. A caracterização física das amostras apresentou altos índices de plasticidade caracterizando as amostras de material como argilosas e siltito-argilosas bem como devem se comportar os solos utilizados para fins de impermeabilização.

Palavras-chave: Permeabilidade. Infiltração. Reabilitação Ambiental. Mineração de Carvão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Fluxo de água em um permeâmetro de carga constante.....	23
Figura 02 - Sistema para aplicação e medição de fluxo de cargas hidráulicas de nível variável.....	25
Figura 03 - Escala granulométrica das frações constituintes do solo.....	26
Figura 04 - Classificação da granulometria do solo conforme proporção dimensional dos materiais constituintes.	28
Figura 05 - Conjunto de peneiras utilizadas em ensaio granulométrico por peneiramento.	29
Figura 06 - Definição da altura L no ensaio de sedimentação.	30
Figura 07 - Vista em planta e perfil do solo no aparelho Casagrande.....	32
Figura 08 - Afloramentos da jazida de empréstimo (material argiloso) utilizado na cobertura de camada de rejeito da área em processo de reabilitação ambiental (Zona 4).....	40
Figura 09 - a e b) Afloramento 01; c e d) Afloramento 03.	41
Figura 10 - Coleta de amostra indeformada de solo na área em processo de reabilitação encaminhada para ensaio de permeabilidade.	42
Figura 11 a-d) - Ensaio de densidade <i>in situ</i> realizado na área em processo de reabilitação ambiental.	45
Figura 12 a - d) - Ensaio de caracterização física (Limite de Liquidez) realizado na amostra 01 em laboratório.	48
Figura 13 - Ensaio de compactação realizado em amostra de solo da jazida de material de empréstimo.....	50
Figura 14 - Descompactação e secagem de amostra de solo em estufa realizadas em Ensaio Proctor Normal.	51
Figura 15 - Instalação dos anéis concêntricos e régua de medição.....	53
Figura 16 - Leitura da lâmina de água infiltrada.	54
Figura 17 - Determinação da espessura da camada de solo com trado manual (a, b, c, d).	55
Figura 18 - Tubo preparado para a saturação do solo.	56
Figura 19 - Processo de quarteamento da amostra de solo utilizada em ensaio de compactação.....	57

Figura 20 - Corte de extração de material de empréstimo formador do primeiro afloramento.58

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Intervalos de variação de coeficiente de permeabilidade para os tipos de solo.....	22
Tabela 02 - Classificação dos ensaios de permeabilidade conforme a maneira de realização e a carga aplicada.....	37
Tabela 04 - Classificação do solo segundo a sua VIB.	53
Tabela 05 - Caracterização física das amostras de solo da jazida de empréstimo. ..	61
Tabela 06 - Resultados de densidade in situ das amostras de solo em campo.....	62
Tabela 07 - Valores de densidade seca máxima e umidade ótima para as amostras ensaiadas em laboratório da jazida de empréstimo.	63
Tabela 08 - Classificação do solo dos pontos ensaiados segundo a Velocidade de Infiltração Básica – VIB.	64
Tabela 09 - Permeabilidade das amostras da jazida de empréstimo em laboratório.	65
Tabela 10 - Resultados obtidos através dos ensaios de campo para infiltração e densidade.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway Officials
ABGE	Associação de Engenharia e Geologia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMREC	Associação dos Municípios da Região Carbonífera
A.S.T.M	American Society for Testing and Materials
BCC	Bacia Carbonífera Catarinense
CAEEB	Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras
CETEM	Centro De Tecnologia Mineral
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CTCL	Centro Tecnológico do Carvão Limpo
DAM	Drenagem Ácida de Mina
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
FATMA	Fundação do Meio Ambiente
FTC	Ferrovias Teresopolis
GTA	Grupo Técnico de Assessoramento
HRB	Highway Research Board
IESA	Internacional de Engenharia
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
K	Coeficiente de Permeabilidade
LABGEO	Laboratório de Geotecnia
LAVACAP	Lavador Central de Capivari
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MPF	Ministério Público Federal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
pH	Potencial Hidrogeniônico
PRAD	Projeto de Recuperação de Área Degradada
ROM	Run of Mine
SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente

SENAI Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SIESESC Sindicato da Industria de Extração de Carvão do Estado de Santa
Catarina
SUCS Sistema Unificado de Classificação de Solos
UNESC Universidade do Extremo Sul Catarinense
VIB Velocidade de Infiltração Básica
ZETA Engenharia e Planejamento Ltda

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 HISTÓRICO DA MINERAÇÃO DE CARVÃO NA BACIA CARBONÍFERA CATARINENSE	16
2.2 PERMEABILIDADE	20
2.2.1 Lei de Darcy	21
2.2.2 Determinação do Coeficiente de Permeabilidade	22
2.2.2.1 Permeabilidade à Carga Constante	22
2.2.2.1.1 <i>Permeômetro de Carga Constante</i>	23
2.2.2.2 Permeabilidade à Carga Variável	24
2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	26
2.3.1 Granulometria	26
2.3.2.1 Análise Granulométrica do Solo	27
2.3.2.1.1 <i>Ensaio de Peneiramento</i>	28
2.3.2.1.2 <i>Ensaio de Sedimentação</i>	29
2.3.2 Limites de Consistência	31
2.3.2.1 Limite de liquidez.....	31
2.3.2.2 Limite de Plasticidade.....	32
2.3.2.3 Índice de Plasticidade.....	33
2.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO SOLO ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
2.4.1 Compactação de Solos	33
2.4.2.1 Proctor Normal	34
2.5 INFILTRAÇÃO.....	35
2.5.1 Capacidade de Infiltração e Taxa de Infiltração	36
2.5.2 Método dos cilindros concêntricos	36
2.6 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE CAMPO	37
2.6.1 Método de Rebaixamento	38
3 METODOLOGIA	39
3.1 MATERIAIS	39
3.1.1 Coleta de Amostras na Jazida de Empréstimo	39
3.1.2 Coleta de Amostras na Área de Estudo	41

3.2 MÉTODOS	42
3.2.1 Ensaios de Caracterização Física.....	42
3.2.2.1 Análise da Densidade em Campo (Densidade Aparente)	43
3.2.2.2 Análise Granulométrica	46
3.2.2.3 Limite de Liquidez.....	47
3.2.2.4 Limite de Plasticidade.....	48
3.2.2 Ensaios de Caracterização Mecânica	49
3.2.3.1 Compactação Proctor Normal	50
3.2.4 Ensaio de Infiltração - Método dos Anéis Concêntricos.....	52
3.2.4.1 Instalação dos Anéis Concêntricos	52
3.2.4.2 Adição de Água nos Anéis	53
3.2.4.3 Leitura da Lâmina de Água Infiltrada.....	53
3.2.4.4 Tratamento dos Resultados	54
3.2.5 Ensaio de Rebaixamento	55
3.2.5.1 Espessura da Camada Argilosa	55
3.2.5.2 Instalação do Tubo	55
3.2.5.3 Saturação do Solo	56
3.2.1 Preparação das Amostras	56
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
4.1 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS.....	58
4.1.1 Jazida de Empréstimo.....	58
4.1.2 Área de Estudo	60
5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	60
5.2.1 Jazida de Empréstimo.....	60
5.1.2 Área de Estudo	62
5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	63
5.3 ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - MÉTODO DOS ANÉIS CONCÊNTRICOS	64
5.4 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE	64
7 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS.....	69
APÊNDICE(S)	72
APÊNDICE A - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM NA ÁREA DE ESTUDO	73
ANEXO(S).....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

ANEXO A - ??????.....ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com CETEM (2001), os primeiros trabalhos da mineração de carvão no sul de Santa Catarina ocorreram no interior do município de Lauro Muller em 1861. Até 1884 predominavam as pequenas produções manuais para extração de carvão mineral. Durante as duas guerras mundiais, o carvão mineral catarinense foi utilizado para atividades econômicas, especialmente como combustíveis para transportes marítimos e ferroviários, além do uso na indústria.

Na década de 40, a mineração de carvão ocorria em diversas regiões da Bacia Carbonífera Catarinense (BCC), principalmente nos municípios de Siderópolis, Treviso, Urussanga, Lauro Muller e Criciúma, que se estabeleceram como centros de produção de carvão no estado (BELOLLI; QUADROS e GUIDI, 2002). Por outro lado, à medida que as reservas minerais eram exauridas, as carboníferas se deslocavam para novos sítios, deixando para trás extensas áreas impactadas com presença de pilhas de estéril e rejeitos de beneficiamento expostos ao ambiente. Essa degradação ambiental na BCC tomou maiores proporções pela falta de planejamento, tecnologia e políticas ambientais (GALATTO, 2006).

Em 2000 o Ministério Público Federal (MPF) do estado de Santa Catarina, sentenciou as empresas carboníferas à obrigatoriedade de apresentação de projetos de reabilitação ambiental (Vinhaes, 2002 apud Nascimento et al., 2002) com prazo para recuperação das áreas em três anos. No caso da recuperação das bacias hidrográficas e lagoas, o prazo seria mais extenso, devendo ser finalizado até 2010 (GALATTO, 2006).

As áreas degradadas pela mineração de carvão na BCC são marcadas pela destruição e esterilidade do solo e da vegetação, em especial, pela poluição dos recursos hídricos. Segundo De Lucca e Gastaldon (1999), a Associação dos Municípios da Região Carbonífera (AMREC) foi a microrregião mais prejudicada pelos impactos da atividade mineira, apresentando cerca de 2/3 dos seus recursos hídricos comprometidos pela Drenagem Ácida de Mina (DAM).

A disposição inadequada de rejeitos está associada aos principais impactos ambientais produzidos durante as etapas de lavra e beneficiamento do carvão mineral. Os rejeitos, constituídos por materiais carbonosos, silicatos e minerais sulfetados sem valor comercial são depositados nas áreas próximas à

mineração, onde sofrem com a infiltração das águas meteóricas e superficiais, gerando a DAM (FUNGARO e IZIDORO, 2006 apud VIGÂNICO, 2009).

A DAM é gerada a partir da reação da água infiltrada com os sulfetos presentes na camada de rejeito, provocando a lixiviação de metais, comprometendo as águas superficiais e subterrâneas, o solo e causando redução da fauna e flora. O Sétimo Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais (2013) aponta que existem 6.503,74 ha de áreas impactadas pela mineração de carvão na BCC (BRASIL, 2013).

Juntamente com a marcassita, a pirita é considerada o principal mineral responsável pela formação da DAM (WANG et. al., 2007 apud VIGÂNICO, 2010). Desde que fora do contato com água e oxigênio a pirita é estável e insolúvel. Como sendo um mineral do grupo dos sulfetos, a pirita (FeS_2) em contato com estes agentes causa uma primeira reação de oxidação gerando um efluente com baixo pH, altas concentrações de ferro na forma Fe^{+2} e Fe^{+3} , sulfatos (H_2SO_4) e outros minerais presentes na matéria mineral, tais como alumínio, manganês e zinco dissolvidos em função da alta acidez (KONTOPOULOS, 1998; SKOUSEN et al., 1998 apud VIGÂNICO, 2010).

Na BCC as principais camadas de carvão mineradas são a camada Barro Branco e a Bonito. Segundo as empresas Rio Deserto (2004), citada por Vigânico (2010), os rejeitos de carvão da camada Barro Branco apresentam teores de pirita entre 10 a 12% enquanto os da camada Rio Bonito, os teores se apresentam entre 12 e 17%. Estes materiais são classificados conforme a ABNT NBR 10004/2004 como Resíduos Não Perigosos do Tipo Não Inerte - Classe II A, apesar de apresentarem um alto potencial de geração de acidez.

O essencial na reabilitação ambiental destas áreas é que os rejeitos e/ou os estéreis sejam removidos ou isolados do ponto de vista hídrico, de forma a fazer cessar a contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos (BRASIL, 2009).

Em projetos de reabilitação de áreas degradadas pela mineração de carvão, a função da camada de baixa permeabilidade é basicamente a redução da infiltração de água e difusão de oxigênio atmosférico no volume de rejeitos com o objetivo de evitar a formação de drenagens ácidas ocasionadas pela interação rejeito/água/oxigênio. Para tal finalidade, vem sendo utilizado como coberturas do solo, uma camada composta por materiais argilosos compactados de espessura e

graus de compactação eficientes à impermeabilização.

A problemática apresentada pelo presente trabalho se refere à discussão sobre as metodologias utilizadas na avaliação da eficiência da aplicabilidade das camadas e a comparação entre os parâmetros apresentados por cada uma delas para garantir que se atinjam resultados confiáveis.

No presente trabalho realizaram-se ensaios de campo a fim de se obter valores de taxa de infiltração nos pontos localizados em área em processo de reabilitação ambiental através do método dos cilindros concêntricos, utilizado atualmente nos monitoramentos das áreas sentenciadas à recuperação ambiental pelo Ministério Público Federal (MPF). Foram realizados ensaios laboratoriais de permeabilidade bem como ensaios de caracterização física e mecânica a partir de amostras de solo coletadas na jazida de empréstimo de material argiloso utilizado na cobertura dos estéreis, da referida área. Em comparativo aos ensaios de infiltração, realizaram-se testes de permeabilidade em campo através do método de rebaixamento.

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência da camada de cobertura do solo quanto à permeabilidade em uma área em processo de reabilitação ambiental através de ensaios realizados em campo e laboratório como forma de contribuir com informações que permitam a melhoria da qualidade dos projetos de reabilitação ambiental.

Para atender ao objetivo geral, elencaram-se os seguintes objetivos específicos:

- Coletar amostras de materiais argilosos;
- Realizar ensaios físicos e mecânicos nas amostras coletadas;
- Mensurar a taxa de infiltração e a permeabilidade em campo e laboratório;
- Avaliar os resultados de permeabilidade em campo e laboratório.

Atualmente não existe consenso ou critérios técnicos precisos quanto a aplicação destes parâmetros, fazendo-se necessária a comparação entre ensaios de campo e laboratoriais e a correlação entre os parâmetros expressos por cada um. Pretende-se com esta ação chegar a um resultado que leve o projetista a valores que garantam a qualidade da camada argilosa quanto à baixa permeabilidade a fim de atingir um nível ótimo de eficiência.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A falta de políticas públicas, planejamento e técnicas adequadas ao controle ambiental na prática da mineração de carvão geraram a grande problemática da degradação de áreas mineradas a céu aberto, especialmente devido à inversão de camadas de cobertura, aliado a disposição inadequada de rejeito de beneficiamento causando um cenário composto por pilhas de estéril e rejeito, seguido de lagoas acidificadas que contaminam ainda hoje os recursos hídricos na Bacia Carbonífera Catarinense (BCC) (BELOLLI; QUADROS E GUIDI, 2002).

Em se tratando de projetos de reabilitação ambiental de áreas degradadas pela mineração do carvão, principalmente quando há ocorrência de depósito de rejeito, faz-se necessário como uma das primeiras medidas, o isolamento destas fontes poluidoras através de camadas impermeabilizantes. A ABNT NBR 13.896/1997 é a norma técnica que fixa as condições mínimas exigíveis para implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, e define impermeabilização como sendo a deposição de camadas de materiais naturais ou artificiais, que impeça ou reduza substancialmente a infiltração no solo dos líquidos percolados, através de uma massa de resíduos.

Segundo Brasil (2013), o Grupo Técnico de Assessoramento (GTA) de execução da sentença de recuperação de áreas degradadas no município de Criciúma, que estabelece os critérios técnicos para a recuperação das áreas impactadas pela atividade de mineração de carvão em Santa Catarina, relata a camada impermeabilizante de cobertura de rejeitos e/ou estéreis não inertes, como sendo:

[...] 4.3. Casos recobertos, essa 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. Ensaios de permeabilidade deverão comprovar a eficiência da impermeabilização, contemplando cobertura e taludes, na razão mínima de um ensaio por hectare.”

Ainda segundo os critérios estabelecidos pelo GTA extraídos de Brasil (2013), a cobertura do solo deve ser estratificada em duas camadas sendo a “camada de baixa permeabilidade”, inferior, composta de material argiloso compactado, e a “camada de proteção”, superior. A espessura das camadas deverá

ser definida no Projeto de Recuperação de Área Degradada (PRAD), ainda assim, caso não haja esta definição no PRAD ou se este considerar a utilização de camadas menos espessas, deverá ser utilizado como parâmetro para a camada de solo argiloso a espessura final de no mínimo 30 (trinta) centímetros.

A metodologia mais comumente utilizada para se verificar a eficiência da camada de cobertura do solo quanto à permeabilidade se baseia no método de campo dos cilindros concêntricos.

Os conceitos de infiltração e permeabilidade têm definições e unidades expressas em unidades diferentes, se fazendo necessário seguir uma recomendação técnica de conversão para uma mesma unidade de medida, pois cada unidade refere-se a um conceito e normas diferentes se fazendo necessária a correlação e em medidas diferentes. O ensaio de permeabilidade fornece o coeficiente “k”, que é o índice empregado para estabelecer o parâmetro de permeabilidade dos solos expressando o resultado em cm/s; enquanto que o ensaio de infiltração *in situ* fornece a Velocidade de Infiltração Básica (VIB), expressando os resultados em cm/h. Para o tratamento conjunto desses conceitos distintos, não existe nenhuma comparação dos dados obtidos a partir das duas metodologias (GARCIA, 2013)

2.1 HISTÓRICO DA MINERAÇÃO DE CARVÃO NA BACIA CARBONÍFERA CATARINENSE

O início da exploração do carvão mineral em Santa Catarina é datado do ano de 1861, quando o imperador D. Pedro II cedeu a concessão da atividade a ser realizado na localidade de Lauro Müller ao político e diplomata Baiano Felisberto Caldeira Brandt. Daquele ano até 1950 acontecimentos importantes afetaram o setor carbonífero levando o carvão catarinense a projeção nacional e também ao declínio em profundas crises. O primeiro impulso ocorreu na Primeira Guerra Mundial, entre 1914 a 1918, e o seguinte na Segunda Guerra (1939 a 1945), quando a demanda do carvão catarinense aumenta devido à impossibilidade de importação do produto. Ainda, registram-se fatores que ajudaram no crescimento da atividade na década de 1930, quando o carvão nacional recebeu apoio do governo, ao ser inserido como importante insumo no desenvolvimento industrial do país e como combustível para acionar as ferrovias e a navegação nacional (BELOLLI; QUADROS E GUIDI, 2002).

Ainda segundo Belolli; Quadros e Guidi, (2002) dois marcos históricos são importantes de serem citados no que se refere ao desenvolvimento da indústria carbonífera catarinense. O primeiro, a construção da Ferrovia Teresa Cristina (FTC), então denominada Estrada de Ferro Dona Teresa Cristina, inaugurada em 1884 que ligava o município de Lauro Müller ao Porto de Imbituba. O segundo credita-se a criação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), implantada em 1942 no Estado do Rio de Janeiro. Como resultado da criação da CSN instalou-se em Capivari de Baixo a usina de beneficiamento de carvão que abastecia o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda implantado em 1965.

No final da década de 40, a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) foi responsável pela expansão da produção de carvão em Santa Catarina e pela política nacional para o consumo do carvão, principalmente após a aquisição da Dragline Marion, em 1959. Neste período o estado ocupava a principal posição na produção de carvão mineral no Brasil como o único fornecedor de carvão à CSN (BELOLLI; QUADROS E GUIDI, 2010).

Durante os anos de 1975 a 1985, Santa Catarina atingiu seu nível de produção máxima, gerando neste período em torno de 125 milhões de toneladas de rejeitos sólidos provenientes da extração e beneficiamento de carvão, neste último ano foram produzidos 19.781.089 t de ROM no estado, os últimos dados desta produção são estimados em 4.468.689 t no ano de 1998 (ALEXANDRE, 1999).

A extração do carvão mineral em minas a céu aberto pelo método de tiras até a década de 1980 foi um dos fatores responsáveis por grande parte da degradação ambiental a qual está submetida atualmente a Bacia Carbonífera Catarinense (BCC), conduzindo as áreas impactadas à inversão de horizontes de solo e rocha, por isso as pilhas de estéreis que hoje são vistas dispostas por centenas de hectares desta região têm suas bases formadas por rochas aflorantes anteriores a abertura das cavas enquanto as litologias que se posicionavam sobre os leitos de carvão recobrem os montes de estéreis. Esta inversão de horizontes causou a exposição de materiais potencialmente poluidores à ação intempérica fazendo ocorrer uma difusão de fontes de contaminação (MILIOLI; SANTOS; CITADINI-ZANETTE, 2009).

Ainda conforme Milioli, Santos e Citadini-Zanete (2009), a extração e o beneficiamento do carvão eram realizados a partir de cortes sucessivos e paralelos ao corte inicial, onde eram retiradas as camadas de solo que recobriam o carvão e dispostas no solo não lavrado, para posteriormente extrair o carvão que era levado

às usinas de beneficiamento, enquanto o rejeito era recolocado nas áreas mineradas nos cortes deixados pela cava anteriormente aberta.

A lavra de subsolo teve início no ano de 1974, realizada pelos métodos de galerias de encosta, plano inclinado ou poço vertical. Até este período os finos de carvão que hoje são destinados ao setor metalúrgico não eram recuperados, sendo descarregados diretamente nos rios afetando cerca de 2/3 dos recursos hídricos da região carbonífera catarinense (ALEXANDRE, 1999).

A degradação ambiental da região carbonífera tomou proporções que levaram a região sul de Santa Catarina ao enquadramento como 14^a Área Crítica Nacional a partir do Decreto n. 85.206 de 25/09/80, para fins de controle da poluição (DE LUCA; GASTALDON, 1999 e ALEXANDRE, 1999).

Com o intuito de minimizar os impactos até então causados pela mineração do carvão na região sul de Santa Catarina algumas providencias foram tomadas pelo governo federal a partir da década de 80, dos quais são citados por Alexandre (1999):

- Em 1981, a criação do Programa de Conservação e Recuperação ambiental da Região Sul de Santa Catarina, que contou com 12 projetos;
- Ainda no mesmo ano, foi estabelecida a Política Nacional do Meio Ambiente através da lei n. 6.983 de 1981;
- Criação da Portaria Interministerial 917 de 06/07/82 que submetiam às mineradoras à aprovação do SEMA e DNPM em prazo de 180 dias os projetos e medidas mitigadoras para: i) tratamento de efluentes líquidos; ii) transporte, manuseio e disposição de resíduos sólidos; iii) recuperação das áreas degradadas;
- Em 05/10/83 estabeleceu-se a outorga de competência à FATMA, pela SEMA para fiscalizar a execução dos projetos provenientes da portaria 917/82.

Devido à degradação ambiental causada nas áreas mineradas onde se localizavam depósitos de rejeitos, em 1985 foram elaborados projetos de controle ambiental as áreas impactadas pelos depósitos de rejeitos do beneficiamento do carvão pelo Consórcio ZETA/IESA, controlados pelo Sindicato da Indústria Extrativa de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIESESC). Os projetos contavam com técnicas de contenção das pilhas pela revegetação, para evitar o escoamento

superficial da água pluvial e a contaminação para os mananciais próximos, que chagavam a atingir o lençol freático (CITADIINI-ZANETTE, 1999).

No mesmo ano o governo limita o preço do carvão para o máximo de 80% do óleo combustível, mantendo o preço do óleo baixo, outra vez o setor carbonífero apresenta dificuldade em se manter, mais ainda na medida em que os incentivos ao setor vão sendo retirados até o ano de 1988 quando são completamente eliminados. (ALEXANDRE, 1999).

Alexandre (1999) cita algumas medidas tomadas pelo governo federal quando este decide retirar-se do setor carbonífero no ano de 1989:

- Extinção da CAEEB (órgão responsável pela comercialização do carvão), tornando livre a negociação entre produtores e usuários do carvão;
- Paralisação da CSN;
- Dispensa as companhias siderúrgicas da obrigatoriedade de consumo de coque nacional;
- Extinção do Lavador Central de Capivari (LAVACAP);
- Liberação da importação de carvão em 1990.

Visando enfrentar o passivo ambiental nas áreas mineradas após o fim das atividades, em 1993 o Ministério Público Federal propôs uma ação civil pública (processo 93.8000533-4), perante a Justiça Federal em Criciúma/SC, da qual decorreu a sentença em janeiro de 2000 em desfavor das empresas carboníferas condenadas a apresentarem “Um projeto de recuperação da região que compõe a Bacia Carbonífera do sul do estado” contemplando “as áreas de depósitos de rejeitos, áreas mineradas a céu aberto e minas abandonadas, bem como o desassoreamento, fixação de barrancas, descontaminação e retificação dos cursos d’água, além de outras obras que visem amenizar os danos sofridos principalmente pela população dos municípios-sede da extração e do beneficiamento”. Juntamente com a sentença determinou-se a apresentação no prazo de seis meses de projeto de recuperação da Bacia Carbonífera do sul de Santa Catarina, com prazo de três anos para a conclusão das obras (BRASIL, 2009).

Entre 2006 e 2009, devido à necessidade de padronização dos projetos de recuperação das áreas sentenciadas, foi criado o Grupo de Assessoramento Técnico do Juízo (GTA). O grupo técnico, composto por representantes dos réus (inclusive a União), SIECESC, Ministério Público Federal, FATMA, DNPM, da

Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e dos comitês das bacias hidrográficas monitoradas foi criado com as seguintes atribuições: i) integrar os dados de indicadores ambientais coletados por todos; ii) elaborar relatórios técnicos periódicos, destinados ao Juízo e sujeitos à ampla divulgação, avaliando a evolução dos indicadores ambientais; iii) propor ações tendentes à plena recuperação ambiental; iv) propor sequência de prioridades na execução de ações de recuperação; v) propor alterações nos indicadores ambientais, e plano de monitoramento, quando entendê-las necessárias; vi) responder tecnicamente a eventuais questionamentos do Juízo.

2.2 PERMEABILIDADE

Permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele devido à existência de vazios interconectados pelos quais a água pode fluir de pontos de alta energia para pontos de baixa energia (CAPUTO, 1996 e DAS, 2007).

Pinto (2002) complementa que na maioria dos solos naturais a água tende a ocupar a maior parte ou a totalidade dos vazios do solo e quando submetida a diferenças de potenciais pode se deslocar no seu interior.

O grau de permeabilidade é expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade k , cuja determinação é feita a partir da lei experimental de Darcy, onde se considera que a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico (CAPUTO, 1996, p.66).

O estudo da permeabilidade do solo é considerado por Pinto (2002) importante em diversos projetos de engenharia, abrangendo basicamente três tipos de problemas práticos, sendo estes: i) cálculos de vazões utilizados em estimativas de infiltração de água; ii) análises de recalques, já que frequentemente os recalques estão relacionados à diminuição do índice de vazios; iii) estudos de estabilidade de solo que dependem de tensões provocadas pela percolação de água no solo.

Seus conceitos são considerações importantes em projetos ambientais que visam o isolamento de fontes de contaminação através de camadas de solo cujas características e condições as quais são submetidos devem atingir um coeficiente de permeabilidade no qual são capazes de impedir a percolação e o

contato de água com os rejeitos, evitando a contaminação de solo e recursos hídricos pelos poluentes devidamente isolados.

Em projetos ambientais tem-se utilizado como embasamento normativo para a construção das camadas de permeabilização as normas ABNT NBR 13.896/1997 e ABNT NBR 10.157/1987, relativas a aterros de resíduos não perigosos e resíduos perigosos - critérios para projeto, construção e operação.

2.2.1 Lei de Darcy

O gradiente hidráulico é o valor adimensional calculado a partir da relação entre a perda de carga escoada e a distância entre dois pontos que medem o comprimento do fluxo pelo qual a carga percolou. Em condições de baixo gradiente hidráulico com crescimento gradual, nota-se que o fluxo de água que permanecia laminar passa a ser turbulento, sendo assim, a velocidade v de escoamento da água está diretamente relacionada ao gradiente hidráulico i . Através deste parâmetro se define o regime de escoamento do fluxo de água em uma massa de solo (DAS, 2007).

Utiliza-se a lei de Darcy em cálculos de escoamento “laminar”, bem como ocorrem à maioria dos escoamentos em solos naturais. É considerado escoamento laminar aquele no qual as trajetórias das partículas de água não se cortam, caso contrário, o escoamento é considerado turbulento (CAPUTO, 1996).

Caputo (1996) sugere que se trabalhe com a área total A da seção transversal bruta do solo ao invés da área média de seus vazios por conveniência. Daí, então, o coeficiente de permeabilidade k é definido como sendo a velocidade média aparente v de escoamento da água através da área total (sólidos + vazios) da seção transversal do solo, sob um gradiente hidráulico unitário ($i=1$). Logo, a lei de Darcy assume a expressão apresentada na Equação 01.

$$v = k.i \qquad \text{Eq.: 01}$$

O coeficiente de permeabilidade mede por tanto a resistência viscosa ao fluxo de água (MASSAD, 2003 p.2).

A expressão dimensional de k é expressa geralmente em cm/s. A relação entre os coeficientes de permeabilidade e de percolação pode ser facilmente

estabelecida considerando ser a área média dos vazios do solo diretamente proporcional ao volume de vazios, assim, a descarga total Q através de uma área A em um determinado intervalo de tempo t assume o formato apresentado na Equação 02 por Caputo (1996):

$$vp = \frac{Q}{Av} = kp \cdot i \quad \text{Eq.: 02}$$

2.2.2 Determinação do Coeficiente de Permeabilidade

A determinação do coeficiente de permeabilidade k pode ser realizada através de ensaios laboratoriais com permeômetros que podem trabalhar com nível constante ou variável, além de ensaios de campo ou através de métodos indiretos onde o coeficiente k é calculado por fórmulas que o relacionam com a granulometria do solo. Os coeficientes de permeabilidade são geralmente expressos como um produto de um número por uma potência negativa de 10. Em ensaios em solos compactados são verificados valores exponenciais de 10^{-7} à 10^{-9} (cm/s), que são considerados solos impermeáveis para todos os problemas práticos (CAPUTO, 1996, p.71).

Na Tabela 01 Soares e Tavares (2006) apresentam os intervalos de variação de k analisados em diferentes tipos de solos:

Tabela 01 - Intervalos de variação de coeficiente de permeabilidade para os tipos de solo.

Tipo de Solo	k (cm/s)	Permeabilidade
Pedregulhos	$> 10^{-3}$	Alta
Areias	10^{-3} a 10^{-5}	Alta
Silte e Argilas	10^{-5} a 10^{-7}	Baixa
Argilas	10^{-7} a 10^{-9}	Muito baixa
Argilas	$< 10^{-9}$	Baixíssima

Fonte: SOARES; TAVARES (2006).

2.2.2.1 Permeabilidade à Carga Constante

O coeficiente de permeabilidade a uma carga constante conforme Caputo (1996) pode ser determinado medindo-se a quantidade de água, mantida em nível constante, que atravessa em um tempo t uma amostra de solo de secção A e altura L conhecida. Sendo Q a quantidade de água que atravessa a amostra e h o desnível entre a superfície de entrada da água e a superfície de saída, representado pela Equação 03:

$$Q = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A \cdot t \quad \text{Eq.: 03}$$

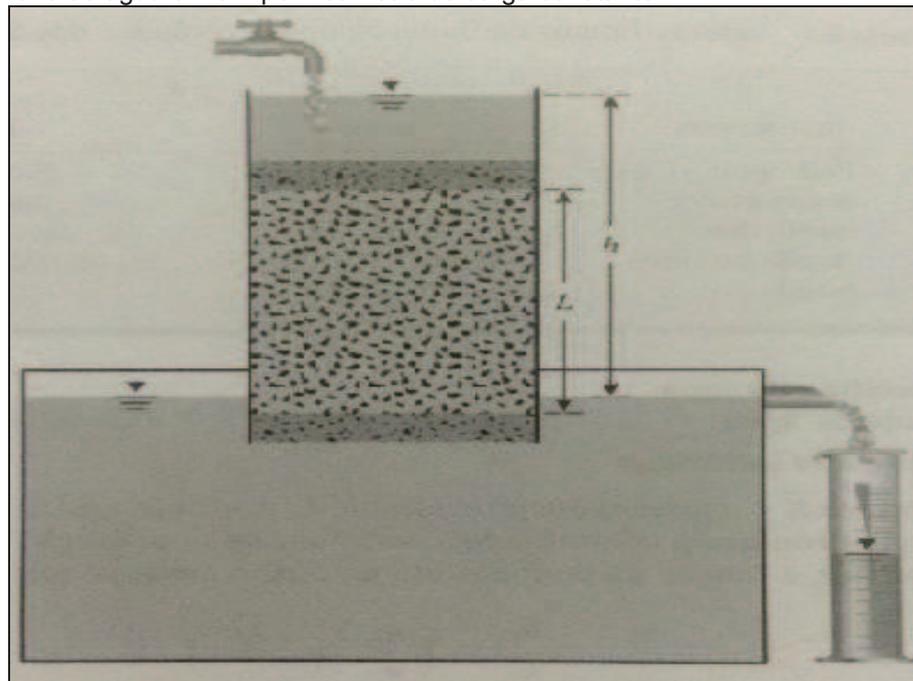
O coeficiente de permeabilidade passa a ser expresso na forma da Equação 04:

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad \text{Eq.: 04}$$

2.2.2.1.1 Permeâmetro de Carga Constante

Segundo Das (2007) o ensaio de permeabilidade de carga constante consiste em uma instalação laboratorial, onde o fornecimento de água na sua entrada é ajustado para que a diferença de carga entre a entrada e a saída do sistema permaneça constante durante a realização do ensaio (Figura 01).

Figura 01 - Fluxo de água em um permeâmetro de carga constante.



Fonte: Das (2007).

O procedimento permite determinar a vazão constante do líquido que atravessa o sistema. O líquido percolado é coletado em frasco graduado durante um período de tempo t . O volume total de água coletada Q pode ser calculado através da relação entre a área da seção transversal da amostra de solo A e o tempo t de coleta de água expressos na Equação 05:

$$Q = A \cdot v \cdot t = A(k \cdot i)t \quad \text{Eq.: 05}$$

Se o gradiente hidráulico i é igual à carga percolada em um comprimento L , neste caso o comprimento do corpo de prova, tem-se que (Equação 06):

$$Q = A \left(k \cdot \frac{h}{L} \right) t \quad \text{Eq.: 06}$$

Logo, o coeficiente de permeabilidade em ensaio de carga constante pode ser expresso através da Equação 07:

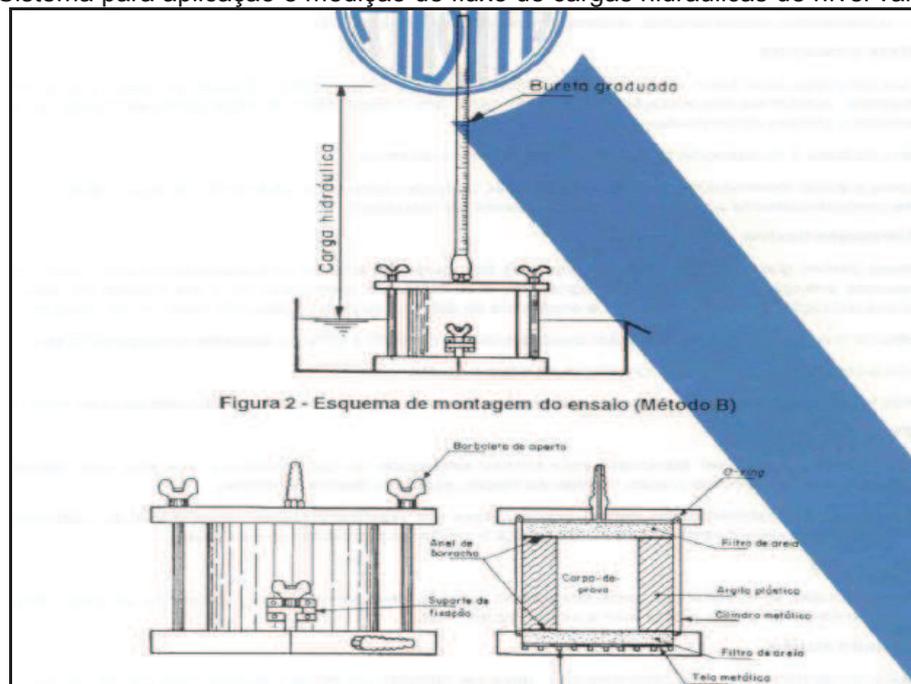
$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad \text{Eq.: 07}$$

2.2.2.2 Permeabilidade à Carga Variável

A instrução normativa ABNT NBR 14.545/2000 referente a ensaios de permeabilidade de solos argilosos a carga variável estabelece os critérios e especifica a metodologia para a aplicação do ensaio.

Segundo a referida norma o ensaio constitui-se na aplicação de dois sistemas conjuntos (Figura 02). Para a aplicação e medição de cargas hidráulicas utiliza-se uma bureta de vidro graduada em décimos de centímetro cúbico acoplada ao orifício superior presente na tampa do sistema e para a realização do ensaio um permeâmetro comportando um cilindro metálico de aproximadamente 15 cm de diâmetro e 13 cm de altura, acoplado a duas tampas e um recipiente com água onde o permeâmetro fica parcialmente imerso durante o ensaio. Na tampa inferior existe um orifício por onde ocorre a entrada e a saída de água nas fases de saturação e de leitura, enquanto na tampa superior deve conter um orifício central para a saída de ar durante a fase de saturação e a entrada de água na fase de leitura. Na superfície inferior e superior fazem parte da montagem do sistema os *o'rings*, anéis de borracha e tela metálica necessários para evitar o contato da areia com a argila plástica que envolve o corpo de prova.

Figura 02 - Sistema para aplicação e medição de fluxo de cargas hidráulicas de nível variável.



Fonte: Norma Brasileira Regulamentadora 14.545:2000

No procedimento laboratorial um cilindro metálico é envolto por argila plástica e acoplado à base do permeâmetro preparada com tela de arame de malha de 2 mm de espessura sobre a tampa inferior do sistema e camada de areia grossa de espessura de 1 cm sob um *o'ring*. Na parte superior do cilindro une-se ao sistema um *o'ring* cobrindo o topo do anel formado pela argila que circula o corpo-de-prova. O restante da altura do cilindro é preenchido com areia grossa seguida da tampa superior do permeâmetro (NBR 14.545:2000).

A realização do ensaio procede saturando-se o corpo-de-prova por meio de percolação no sentido ascendente através do orifício existente na tampa inferior do sistema. O processo deve ocorrer com o surgimento de água no orifício superior e percolação sem a presença de bolhas de ar. Através do sistema de aplicação e medição de cargas hidráulicas conectado ao orifício superior do sistema o ensaio prossegue efetuando-se medidas das cargas hidráulicas, dos tempos decorridos e da temperatura da água que percola pelo corpo-de-prova. A conclusão do ensaio se dá alcançando pelo menos quatro determinações semelhantes (NBR 14.545:2000).

O ensaio de permeabilidade a carga variável para Caputo (1996) é mais vantajoso que o ensaio com carga constante quando aplicado em solos finos. A expressão do coeficiente de permeabilidade (Equação 08) é dada pela relação entre as medidas da variação entre os tempos t_1 e t_2 e as medidas de carga hidráulica em

cada instante t , bem como as medidas da área interna da bureta de vidro a , da altura inicial do corpo-de-prova H e da área inicial do corpo-de-prova A .

$$k = 2,3 \frac{La}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Eq.: 08}$$

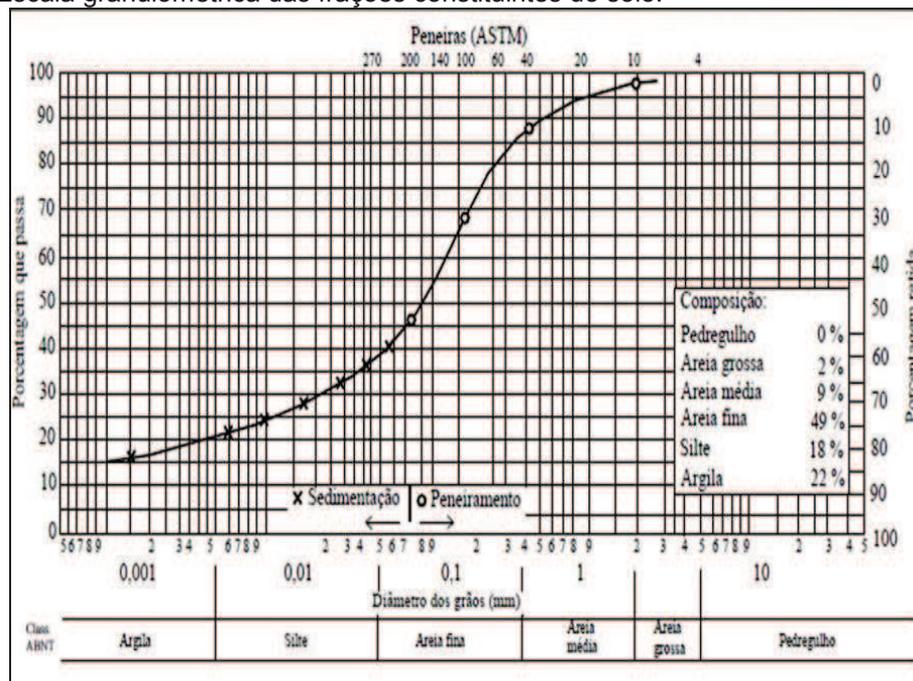
2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

2.3.1 Granulometria

As frações constituintes do solo podem ser classificadas conforme a dimensão das suas partículas dentro de determinados limites, recebendo denominação própria cuja interpretação identifica o tipo de solo. De acordo com a escala granulométrica brasileira (ABNT) os solos podem ser classificados quanto à dimensão de suas partículas em: Pedregulho (diâmetro equivalente entre 76 e 4,8 mm); areia (entre 4,8 e 0,05 mm); silte (entre 0,05 e 0,005 mm); argila (inferior à 0,005 mm) (CAPUTO, 1996).

A classificação das frações constituintes do solo pode ser representada através da escala granulométrica extraída de Pinto (2002) (Figura 03).

Figura 03 - Escala granulométrica das frações constituintes do solo.



Fonte: Pinto (2002).

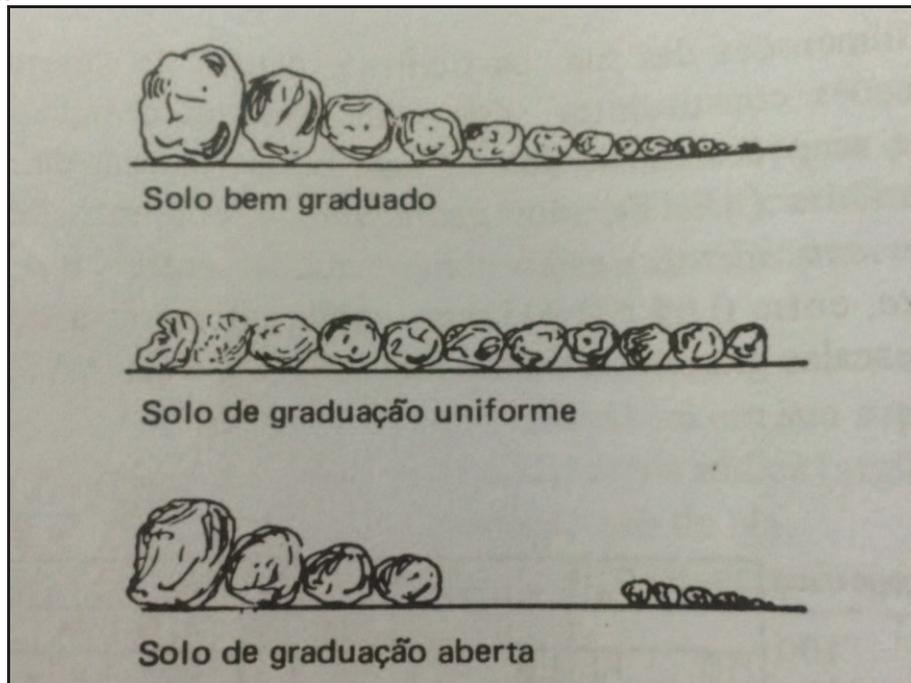
A identificação da granulometria de um solo é uma análise muitas vezes difícil, devido à presença de materiais argilosos envolvidos nas amostras granulares, podendo estas, serem confundidas com aglomerações formadas exclusivamente por material argiloso. As duas formações de solo são muito semelhantes quando secas, porém, quando umedecidas as partículas argilosas se apresentam na forma de uma pasta fina, enquanto o restante das partículas do solo pode ser facilmente reconhecido através do tato. Por isso, em uma análise granulométrica é fundamental que o solo se apresente com alto teor de umidade (PINTO, 2002).

2.3.2.1 Análise Granulométrica do Solo

A análise granulométrica tem por objetivo determinar a dimensão das partículas do solo e das proporções relativas em que elas se encontram, expressando-as em percentual do peso total seco (CAPUTO, 1996 e DAS 2007).

A análise granulométrica é representada graficamente através da curva granulométrica, traçada por pontos em um diagrama semi-logarítmico onde o eixo das abscissas expressa às dimensões das partículas e no eixo das ordenadas as porcentagens, em peso, do material de dimensão média menor que a dimensão considerada, ou seja, o material passante pela malha granulométrica específica. Através da forma da curva pode-se diferenciar a granulometria do solo e classificar conforme a proporção das dimensões encontradas (Figura 04), sendo estas: contínua ou descontínua; uniforme; bem graduada ou mau graduada (CAPUTO, 1996).

Figura 04 - Classificação da granulometria do solo conforme proporção dimensional dos materiais constituintes.



Fonte: CAPUTO (1996).

A determinação da dimensão das partículas do solo pode ser realizada através dos métodos de peneiramento - para tamanhos de partículas maiores que 0,075 mm de diâmetro e método de sedimentação - para tamanhos de partículas menores que 0,0075 mm de diâmetro (DAS, 2007).

2.3.2.1.1 Ensaio de Peneiramento

Ensaio realizado em amostras cuja dimensão das partículas se apresentam maiores que 0,074 mm (peneira nº 200 da A.S.T.M) (CAPUTO, 1996).

O procedimento é realizado após a secagem do solo em estufa e do rompimento de torrões existentes na amostra em pequenas partículas. A partir daí o ensaio procede com a agitação da amostra de solo fazendo-o atravessar peneiras cujas malhas possuem aberturas progressivamente menores de cima para baixo (Figura 05). Após a passagem total da massa de solo, a quantidade retida em cada peneira é determinada. Em análises de solos coesivos pode-se haver dificuldade na ruptura dos torrões de solo, nestes casos mistura-se o solo com água formando uma pasta semi-fluida lavada através das peneiras, e as medidas de massa retidas em cada peneira são secas separadamente em estufa antes da pesagem (DAS, 2007).

Figura 05 - Conjunto de peneiras utilizadas em ensaio granulométrico por peneiramento.



Fonte: DAS (2007).

2.3.2.1.2 Ensaio de Sedimentação

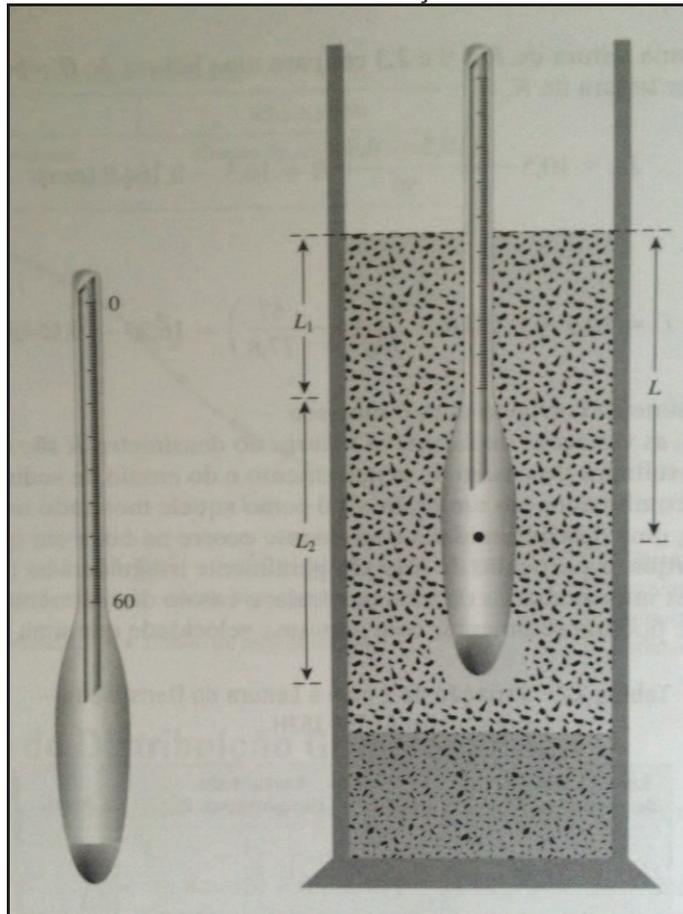
O ensaio de sedimentação segundo DAS (2007) se baseia na sedimentação dos grãos de solo em água. Em ensaios onde ocorre a dispersão de solo em água, nota-se que as partículas decantam em velocidades diferentes devido ao tamanho, forma, peso de cada partícula e da viscosidade da água. Por convenção, assume-se que cada partícula de solo tem a forma de uma esfera e que a velocidade de sedimentação pode ser expressa pela lei de Stokes, onde a velocidade de decantação das partículas está relacionada com a massa específica do solo (ρ_s), massa específica da água (ρ_w), viscosidade da água (η) e o diâmetro das partículas do solo (D) (Equação 09):

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2$$

Eq.: 09

O método de ensaio descrito por Caputo (1996) consiste em dispersar uma amostra de solo em meio aquoso, juntamente com um defloculante adicionado à mistura para a melhor dispersão dos elementos. Logo, aplica-se a esta solução um dispersor que pode ser elétrico ou manual, durante alguns segundos. Por fim, verte-se toda a solução em uma proveta tarada para 1000 cm³. A mistura é agitada dentro do cilindro, onde se introduz um densímetro previamente tarado lendo-se sobre a graduação o seu afundamento progressivo em determinados intervalos de tempo. Ao final do ensaio nota-se no sedimento uma distinção de partículas de tamanhos decrescentes. Conhecendo-se a quantidade de solo em suspensão, L em um tempo t pode-se calcular a porcentagem de solo por peso mais fino que um diâmetro dado. Nota-se que L é a profundidade medida a partir da superfície da água para o centro de gravidade do bulbo do densímetro no qual a densidade da suspensão é medida (Figura 06).

Figura 06 - Definição da altura L no ensaio de sedimentação.



Fonte: DAS (2007).

2.3.2 Limites de Consistência

Avaliando-se o comportamento do solo quanto ao seu teor de umidade pode-se classificá-lo em quatro fases: sólido, semi-sólido, plástico e líquido. Nos extremos dessas fases são evidenciados dois comportamentos diferentes. Quando o teor de umidade é muito alto em uma amostra de solo, ambos tendem a fluir como um líquido, enquanto que em solos com baixa umidade o solo tende a se comportar como um sólido. Os parâmetros que compreendem a transição de uma fase para outra são denominados limites de Atterberg e Haines (DAS, 2007).

Um solo com teor de umidade alto se compreende no estado líquido e tende a se comportar como um fluido denso, este mesmo solo perdendo umidade endurece passando para o estado plástico. O ponto de transição entre os dois estados é compreendido como limite de liquidez, esta consistência se observa enquanto a amostra ainda pode ser moldada. Perdendo mais umidade o solo entra no estado semi-sólido, cujo ponto de transição é compreendido como limite de plasticidade, este estado se observa quando o solo se esfarela ao ser trabalhado. Com uma perda de umidade maior o solo passa para o estado sólido cujo limite entre os dois estados é o limite de concentração (CAPUTO, 1988).

A padronização dos procedimentos de determinação do limite de plasticidade e liquidez no Brasil é feita pelas normas ABNT NBR 7.180/1984 e ABNT NBR 6459/1984.

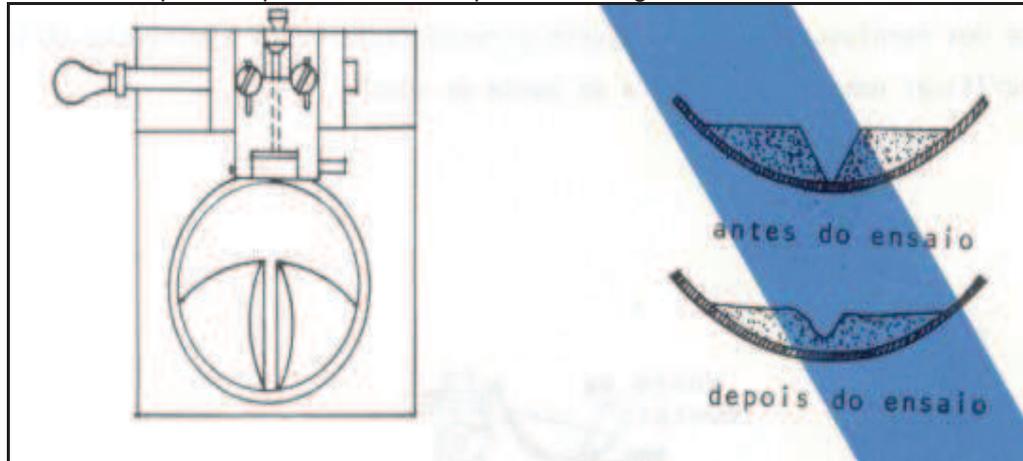
2.3.2.1 Limite de liquidez

O limite de liquidez é dado pelo teor de umidade necessário em uma amostra de solo para que esta se deforme e seja possível de ser moldada sem se desfragmentar (DAS, 2007).

O limite de liquidez é encontrado em laboratório a partir do aparelho Casagrande (Figura 07), que consiste em uma concha de latão fixa a uma base de borracha rígida. Colocando-se a amostra úmida na concha abre-se um sulco no centro da amostra com a ferramenta padrão denominada cinzel. Utilizando um excêntrico operado por uma manivela realizam-se repetidas quedas da altura de um (1) cm e intensidade constante no prato. O limite de liquidez é definido como o teor de umidade ideal para que após a aplicação de exatos 25 golpes, os 12,7 mm de

distância referentes à abertura realizada na amostra através do cinzel se fechem ao longo da parte inferior do sulco (CAPUTO, 1988 e DAS, 2007).

Figura 07 - Vista em planta e perfil do solo no aparelho Casagrande.



Fonte: NBR 6459/1984.

O procedimento adequado para se ajustar a umidade ideal e se atingir o limite de liquidez do solo se faz através da plotagem de gráfico que apresenta o teor de umidade em % para a reta y e os números de golpes para a reta x. No gráfico, as duas retas são aproximadas por uma linha reta denominada curva de fluidez. O limite de liquidez então é tido como a umidade presente na amostra de solo correspondente a aplicação de 25 golpes do aparelho Casagrande (DAS. 2007).

2.3.2.2 Limite de Plasticidade

A plasticidade é considerada por Caputo (1988), como uma das mais importantes características dos solos argilosos. Trata-se da capacidade de se moldar uma amostra de solo com determinado teor de umidade sem que ocorra variação de volume.

Considerando ser o limite de plasticidade o limite mais baixo do intervalo do solo encontrado no ponto de transição do estado plástico para o estado semi-sólido, Das (2007) o define como sendo o teor de umidade no qual o solo desfragmenta ao ser rolado na forma de um cilindro de 3,2 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento.

O ensaio que determina o limite de plasticidade é realizado manualmente através do rolamento da amostra de solo de forma elipsoidal sobre uma placa de

vidro despolido, o teor de umidade necessário na amostra para que o cilindro não se quebre é tido como o limite de plasticidade do solo (DAS, 2007).

2.3.2.3 Índice de Plasticidade

O índice de plasticidade é o critério utilizado para se aferir a característica argilosa de um solo, já que considera-se para as argilas um estado de plasticidade máximo, enquanto para as areias a plasticidade é considerada nula. Sendo assim, quanto maior o índice de plasticidade de um solo mais argiloso este será (CAPUTO, 1988).

O índice de plasticidade segundo Das, (2007) é dado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (Equação 10):

$$IP = LL - LP \quad \text{Eq.: 10}$$

2.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO SOLO

2.4.1 Compactação de Solos

A porosidade do solo é entendida por Tucci et al. (2004) como a média relativa dos vazios de um meio poroso. Tem relação direta com o armazenamento e a infiltração de água no solo, já que a água flui através da conexão entre os vazios. A porosidade é, portanto, a fração de vazios contidos em um volume representativo de meio poroso. Em materiais granulares esta depende da forma, do grau de compactação e da distribuição do tamanho das partículas. A forma das partículas interfere na maneira como elas se encaixam entre si, granulometrias irregulares contribuem com o alto grau de porosidade do solo. A compactação do solo tem por objetivo a diminuição dos espaços vazios do solo, quanto mais compactado menor a porosidade do meio. Solos granulares uniformes apresentam menor porosidade já que quando bem distribuídos os grãos menores ocupam os espaços vazios existentes entre os grãos maiores.

Segundo Pinto (2002) a compactação de um solo se faz a partir da aplicação de forças mecânicas em uma determinada camada de solo provocando a sua densificação por meio da remoção de ar. Em obras de engenharia são

normalmente utilizados rolos compressores, no entanto em casos de pequenas porções de solo pode ser adequada a utilização de soquetes manuais.

Em ensaios laboratoriais de compactação deve-se entender um dos princípios da mecânica dos solos citado por Vargas (1977) que afirma que a densidade com que um solo é compactado depende da umidade do solo durante a compactação. Este princípio, creditado ao engenheiro norte americano Proctor deu origem a técnica de ensaio laboratorial mais comumente utilizada para se obter o grau de compactação de solos.

2.4.2.1 Proctor Normal

De acordo com a norma técnica ABNT NBR 7182/1986 que padroniza o método de ensaio de compactação denominado Proctor Normal no Brasil, tem-se por objetivo determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos quando compactados.

Quando se compacta uma porção de solo a umidade presente na amostra age com efeito de lubrificação diminuindo o atrito entre as partículas de solo e conseqüentemente os espaços vazios adensando a porção de solo; nestes casos o aumento da massa específica será correspondente ao escapamento de ar presente nos espaços vazios, entretanto, quando o teor de umidade toma proporções muito elevadas a saída de ar da amostra de solo é prejudicada, pois com o grau de saturação do solo já elevado o ar fica preso nas moléculas de água, havendo portanto, a necessidade de utilização de um teor de umidade específico para a energia aplicada entendida como *umidade ótima* e que conduz a amostra de solo a uma *densidade seca máxima* (PINTO, 2002).

Após um primeiro ensaio no qual se obtenha o valor de umidade, a amostra é seca e calcula-se o valor da massa específica aparente, este valor é lançado no diagrama de Proctor. Adicionando mais água à porção de solo o processo é refeito. Conforme Pinto (2002) se o ensaio iniciou com 5% de umidade a baixo da ótima e os acréscimos forem de 2% a cada tentativa, o ensaio estará concluído a partir de 5 determinações, em seguida, pode-se traçar a curva de compactação onde são apresentadas a densidade seca máxima em função da umidade.

Inserindo uma reta para os pontos ascendentes do ramo seco e outra aos pontos descendentes do ramo úmido obter-se-á uma curva parabólica da qual se pode extrair a densidade seca máxima correspondente à umidade ótima (PINTO, 2002).

2.5 INFILTRAÇÃO

Infiltração é conceitualmente entendida como a passagem de água da superfície para o interior do solo. É um processo que depende basicamente da disponibilidade de água para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar preexistentes no seu interior. A infiltração de água no solo através de processos naturais normalmente se limita a saturar as camadas próximas a superfície do solo, sem capacidade para saturar o solo nas camadas mais profundas. Nestes casos constitui-se um perfil de solo onde o teor de umidade decresce juntamente com a profundidade do solo (TUCCI et al., 2004).

Enquanto houver aporte de água, a superfície e posteriormente a profundidade do solo tendem a saturar. Quando a infiltração termina devido à disponibilidade de água, a umidade do solo se distribui invertendo o perfil de umidade do solo, aí então, a profundidade apresenta maiores teores de umidade do que a superfície. Nas camadas inferiores do solo, pode ser encontrada uma zona de saturação, cuja interferência no processo de infiltração do solo só é significativa quando situada à pequena profundidade (TUCCI et al., 2004).

O ensaio de infiltração *in situ* com cilindros concêntricos é uma técnica para se aferir a eficácia de camadas de cobertura de baixa permeabilidade, sendo indicado pelo GTA através dos critérios técnicos propostos para avaliar a recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão no sul de Santa Catarina em Brasil (2013).

De acordo com Poot (2001), a VIB é a taxa de entrada de água no solo com variação temporal em função do umedecimento do perfil de solo. A taxa de infiltração decresce com o tempo até atingir um valor mínimo constante definido como velocidade de infiltração básica.

2.5.1 Capacidade de Infiltração e Taxa de Infiltração

Segundo Tucci (2004), o conceito de capacidade de infiltração é entendido como o potencial que o solo tem de absorver água da sua superfície. A capacidade de infiltração se diferencia do conceito de taxa de infiltração, que determina a taxa real de infiltração que o solo possui enquanto houver disponibilidade de água para penetrar no solo. Com o fim da infiltração em uma camada de solo, uma parte da água infiltrada percola para as camadas mais profundas, enquanto outra quantidade de água sofre evaporação direta ou se perde através da transpiração dos vegetais. Através deste processo o solo pode recuperar a sua capacidade de infiltração à medida que a umidade se perde e as camadas superiores do solo vão se tornando mais secas.

Quando a infiltração atinge o solo com intensidade menor que a capacidade de infiltração a água penetra totalmente no solo, enquanto isso a capacidade de infiltração tende a diminuir devido ao umedecimento do solo. Enquanto houver descarga de água no solo, dependendo da intensidade, o solo pode chegar a um ponto de saturação no qual a capacidade de infiltração diminui até se igualar a da infiltração. Neste momento a infiltração real se processa nas mesmas taxas de capacidade de infiltração que tende a decrescer até um valor mínimo de infiltração. Com o fim da infiltração a taxa de infiltração real se anula enquanto a capacidade de infiltração volta a crescer com a perda de umidade (TUCCI, 2004).

2.5.2 Método dos cilindros concêntricos

O objetivo do ensaio de infiltração com cilindros concêntricos é a obtenção da Velocidade de Infiltração Básica (VIB) na superfície do solo. O ensaio é caracterizado pela utilização de dois cilindros, sendo um externo e o outro interno. O cilindro externo tem a finalidade de direcionar o fluxo de água infiltrada pelo cilindro interno verticalmente. Os cilindros são constituídos de chapas de aço de 1,5 mm de espessura, com diâmetros do cilindro interno de 28 cm e do externo de 53 cm e alturas iguais de 20 cm (SILVA, 2012).

2.6 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE CAMPO

Conforme a metodologia proposta pela Associação de Engenharia e Geologia - ABGE (1996) o ensaio de permeabilidade em campo consiste na medida da vazão, calculada através do volume d'água absorvido ou retirado, durante um determinado período de tempo, em função da aplicação de diferencial de pressão induzido por coluna d'água, que decorre da injeção ou retirada de água do furo ensaiado. Através da injeção de água no furo podem ser realizados ensaios de infiltração ou ensaios de rebaixamento.

Embora os ensaios de permeabilidade em solos estejam na prática intimamente associados ao método de prospecção empregado (sondagens a trado e a percussão, poços razos e trincheiras), do ponto de vista hidrogeotécnico, tais ensaios podem ser classificados conforme a maneira de realização (ensaios a nível constante e a nível variável) e o diferencial de pressão positivo (carga) ou negativo (descarga) aplicado ao aquífero apresentados na Tabela 02 (ABGE, 1996).

Tabela 02 - Classificação dos ensaios de permeabilidade conforme a maneira de realização e a carga aplicada.

Maneira de Realização	Pressão Aplicada	Denominação	Método de Prospecção
Nível constante	Carga	Infiltração	Sondagens, poços e cavas
	Descarga	Bombeamento	Poços e sondagens
Nível variável	Carga	Rebaixamento	Poços e sondagens
	Descarga	Recuperação	Poços e sondagens

Fonte: ABGE (1996).

O ensaio de infiltração a nível constante é realizado mantendo-se uma carga constante e medindo a vazão necessária para mantê-la. O ensaio de rebaixamento consiste em ensaio de infiltração a nível variável e é realizado estabelecendo-se uma coluna d'água inicial e após a interrupção da introdução de água acompanha-se o tempo necessário para o rebaixamento da lâmina d'água. Analizando a vazão através da retirada de água do tubo podem ser utilizados dois ensaios, sendo estes: i) Ensaio de bombeamento (pontual), no qual a água é bombeada e mede-se a vazão necessária para manter estabilizado o nível rebaixado; ii) ensaio de recuperação no qual a água é bombeada até que o seu nível atinja um nível de rebaixamento suficiente em relação ao nível freático ou piezométrico, medindo-se a partir daí, a velocidade de recuperação (ABGE, 1996).

2.6.1 Método de Rebaixamento

O ensaio de rebaixamento proposto pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) é realizado através da medida do nível d'água dentro do revestimento posicionado no furo ensaiado. O revestimento consiste em um tubo graduado de 7 cm de diâmetro preenchido com água até a boca. As medidas são realizadas obtendo-se o volume de água infiltrada no solo durante determinado intervalo de tempo. As medidas devem ser feitas após a manutenção do tubo de revestimento cheio completamente cheio de água durante 10 minutos, suficientes para a saturação do solo. Após as leituras o ensaio é finalizado quando o rebaixamento atingir 20% de carga inicial aplicada ou após 30 minutos de ensaio. Consideram-se as leituras de absorção de água suficientes quando não for mais observada variação progressiva nos valores lidos ou quando a diferença entre as leituras isoladas e o valor médio não superar 20%.

As medidas de absorção de água são realizadas através de hidrômetro acoplado ao tubo de ensaio. São considerados importantes parâmetros a serem analisados durante o ensaio para o tratamento dos resultados e cálculo do coeficiente de permeabilidade a vazão e nível da água, diâmetro e profundidade do furo e comprimento do trecho ensaiado (ABGE, 1996).

Dentre os vários fatores condicionantes da validade dos ensaios destaca-se o regime de escoamento que deve, teoricamente, ser permanente de maneira a permitir o uso das fórmulas adotadas. Este regime de escoamento pode ser controlado no campo através das medidas de vazão durante a execução dos ensaios quando as vazões permanecerem constantes ao longo do tempo pode-se dizer que foi atingido um regime permanente de escoamento (ABGE, 1996).

Os tempos recomendados pela metodologia proposta para a execução dos ensaios não são considerados suficientes para atingir plenamente um regime de escoamento permanente, no entanto, a partir de dados experimentais estes tempos são considerados suficientes para se atingir resultados satisfatórios, compatíveis com os erros inerentes à própria execução dos ensaios.

A coesão do solo pode ser condicionante na programação dos ensaios, por constituir uma limitação à abertura de poços e trincheiras, e à preparação de trechos de ensaios em furos de sondagens. Com efeito, problemas de desmoronamentos podem influir significativamente nos resultados dos ensaios, e mesmo a impedir a sua realização. Tais problemas podem ser facilmente constatados em poços e trincheiras (ABGE, 1996).

3 METODOLOGIA

Este trabalho compreendeu pela avaliação da permeabilidade e infiltração da cobertura de solo utilizada em uma área em processo de reabilitação ambiental, bem como a análise do material argiloso proveniente da jazida de empréstimo utilizada na reabilitação.

Foi determinada a permeabilidade do material argiloso da jazida de empréstimo a partir de amostras representativas do seu estado natural (amostra indeformada) e compactada até uma densidade máxima (amostra moldada) em laboratório. Em campo realizou-se ensaios de densidade aparente, infiltração e de permeabilidade da cobertura de solo na área em processo de reabilitação.

Para a caracterização física dos materiais foram realizados ensaios densidade aparente, análise granulométrica, limite de liquidez e limite de plasticidade em laboratório. Para caracterização mecânica foi realizado o ensaio de compactação (Proctor Normal).

A permeabilidade em campo foi mensurada através da utilização de ensaio de rebaixamento enquanto a infiltração pelo método dos anéis concêntricos.

O estudo das propriedades físicas e mecânicas bem como a permeabilidade a partir da amostra indeformada (coletada na área em processo de reabilitação) foi conduzido no Laboratório LABGEO localizado na SATC, enquanto os ensaios de permeabilidade da amostra moldada foram realizados no Laboratório SENAI. Os ensaios referentes à permeabilidade e infiltração em campo foram realizados numa área em processo de reabilitação ambiental localizada em Lauro Muller.

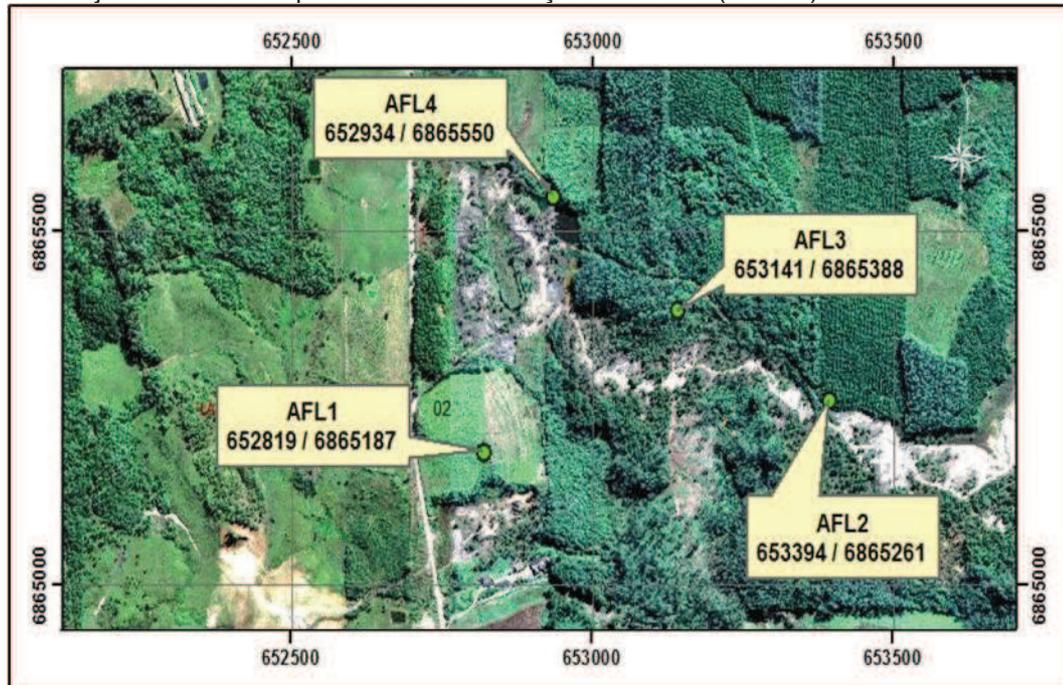
3.1 MATERIAIS

3.1.1 Coleta de Amostras na Jazida de Empréstimo

A jazida de empréstimo de material argiloso onde foi extraído material para a cobertura da área em processo de reabilitação ambiental é caracterizada pela existência de quatro afloramentos (Figura 08). Devido à semelhança dos perfis geológicos dos afloramentos 02 e 04 com o afloramento 01, optou-se pela extração

das amostras realizadas apenas nos afloramentos 01 (652.819 N 6.865.187E) e 03 (653.141 N 6.865.388 E).

Figura 08 - Afloramentos da jazida de empréstimo (material argiloso) utilizado na cobertura de camada de rejeito da área em processo de reabilitação ambiental (Zona 4).



Fonte: GARCIA (2013).

Do afloramento 01 foi extraída a amostra 01, coletada no intervalo compreendido entre 0,8 à 1,90 m e a amostra 02 localizada no intervalo entre 1,90 e 5,5 m. No afloramento 03 foram coletadas a amostra 03 (intervalo de 1,1 à 4,4 m no lado direito da jazida) e amostra 04 (intervalo 2,0 e 5,5 m) (Figura 09).

Figura 09 - a e b) Afloramento 01; c e d) Afloramento 03.



Fonte: GARCIA (2013).

3.1.2 Coleta de Amostras na Área de Estudo

Na área em processo de reabilitação ambiental (Zona 4) foi definido uma Área de Estudo (Apêndice A), onde foram definidos sete locais para amostragem de solo indeformado com trado tipo *Uhland* (Figura 10) visando à realização de ensaios de densidade e permeabilidade de laboratório.

A definição dos sete pontos foi feita de forma aleatória e levou em conta a facilidade de acesso e a melhor representatividade da área de estudo. Definiram-se, portanto, pontos de ensaios que se distribuem nas laterais da estrada que corta a área, com proporções das extensões de distância intercaladas em relação a estrada.

Cabe destacar que nestes mesmos pontos também foram efetuados ensaios de infiltração e testes de rebaixamento em campo, considerando um raio de um metro.

Figura 10 - Coleta de amostra indeformada de solo na área em processo de reabilitação encaminhada para ensaio de permeabilidade.



Fonte: GARCIA (2013).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Ensaio de Caracterização Física

Após os materiais estarem preparados e adequados iniciaram-se os ensaios de caracterização física, conforme as normas ABNT.

Os resultados dos ensaios de caracterização física do solo possibilitaram a sua classificação segundo as propriedades índice (granulometria e plasticidade). A classificação geotécnica do solo foi feita com base no sistema de classificação da *Highway Research Board* (HRB) - Sistema Rodoviário de Classificação proposto pelo *Bureau of Public Roads* e normatizado pela *AASHTO M145* (1973), que classifica o solo inicialmente em dois grandes grupos através da granulometria: Materiais granulares e materiais siltito-argilosos, e posteriormente em subgrupos juntamente com o índice de grupo (IG) empregado na classificação HRB. A classificação do solo se estendeu ainda ao Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Esta versão considera como principais parâmetros classificatórios a distribuição e a forma da curva granulométrica, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e a compressibilidade dos solos. Através da SUCS os solos podem ser

agrupados em três diferentes classes em função do % de material retido na peneira nº 200: Solos de graduação grossa, graduação fina e solos altamente orgânicos.

3.2.2.1 Análise da Densidade em Campo (Densidade Aparente)

Antes da realização do ensaio *in situ* foram realizadas no laboratório a determinação do volume do cilindro de metal, da massa de areia correspondente ao volume do funil e do rebaixo do orifício da bandeja e da massa específica da areia (μA)

Determinação do volume do cilindro de metal

Medindo-se pontos diferentes do cilindro metálico o seu diâmetro foi calculado a partir da média aritmética entre as medidas obtidas do diâmetro D e altura L e aplicando-se a equação de volume para cilindros, dada por:

$$V_c = \frac{\pi D^2 h}{4} \quad \text{Eq.: 11}$$

Determinação da Massa da Areia Correspondente ao Volume do Funil e do Rebaixo do Orifício da Bandeja

O frasco com a areia juntamente com o funil foi pesado para se obter a primeira medida de massa (M1). Instalando o conjunto frasco + funil sobre a cavidade da bandeja sobreposta em uma superfície plana e sobre o rebaixo do orifício da bandeja abre-se o registro deixando a areia escoar até que o movimento cesse. O conjunto contendo a areia restante foi pesado a fim de se obter a segunda medida de massa (M2). A massa da areia deslocada (M3), para preencher o volume do funil e do rebaixo do orifício da bandeja é dada por:

$$M3 = M1 - M2 \quad \text{Eq.: 12}$$

Determinação da Massa Específica Aparente da Areia (μA).

Pesou-se o frasco cheio de areia juntamente com o funil para se obter a medida de massa (M4). O conjunto é encaixado na cavidade da bandeja sobre o cilindro, logo o registro é aberto deixando a areia escoar para o cilindro até que o movimento cesse. O frasco com a areia restante e o funil foram novamente pesados para se obter a medida de massa (M5). A massa da areia que encheu o cilindro foi determinada por:

$$M6 = M4 - M5 - M3 \quad \text{Eq.: 13}$$

Onde:

M6: Massa da areia do cilindro

M4: Massa do frasco + areia + funil

M5: Massa do frasco + funil + areia restante

M3: é a massa da areia do funil + rebaixo da cavidade da bandeja.

A massa específica da areia μ_a foi determinada através da fórmula:

$$\mu_a = \frac{M6}{V_c} \quad \text{Eq.: 14}$$

Determinação da Densidade “In Situ”

Retirou-se a cobertura vegetal para torná-lo plano e horizontal. Colocando a bandeja sobre o solo preparado abriu-se uma cavidade cilíndrica no solo limitada pelo orifício central da bandeja com aproximadamente 15 cm de profundidade. Da massa extraída do solo foi determinada a umidade total e pesada para se obter o valor (Mh). Pesou-se o conjunto frasco/funil, com o frasco cheio de areia obtendo-se o valor (M7). Após instalar o conjunto completo com areia sobre a bandeja o registro foi aberto deixando a areia escoar para a cavidade no solo, fechando-o assim que o movimento de areia cessou. O conjunto massa do frasco + areia restante + mais funil foi pesado para obter-se o valor (M8) (Figura 11).

Figura 11 a-d) - Ensaio de densidade *in situ* realizado na área em processo de reabilitação ambiental.



Fonte: GARCIA (2013).

Determinação da Massa de Areia Deslocada

O valor da massa de areia deslocada (M_9) é calculado pela subtração da medida de massa correspondente a

$$M_9 = M_7 - M_8 \quad \text{Eq.: 15}$$

Determinação da Massa de Areia que Enche a Cavidade

O valor da massa de areia que enche a cavidade é dado por:

$$M_{10} = M_9 - M_3 \quad \text{Eq.: 16}$$

Determinação da Densidade do Solo Úmido "In Situ" (D_{su})

Calculou-se a densidade do solo úmido a partir da fórmula:

$$D_{su} = \mu_a * \frac{M_h}{M_{10}} \quad \text{Eq.: 17}$$

Onde:

D_{su} : Densidade do solo úmido expressa em (g/cm^3);

μ_a : massa específica aparente da areia expressa em (g/cm^3);

M_h : massa do solo extraído da cavidade;

M10: massa de areia que enche a cavidade.

Determinação da Densidade do Solo Seco “In Situ”

Calculou-se a densidade do solo seco a partir da fórmula:

$$D_{ss} = D_{su} * \frac{100}{100 + U_t} \quad \text{Eq.: 18}$$

Onde:

D_{ss}: densidade do solo seco expressa em (g/cm³);

D_{su}: densidade do solo úmido expressa em (g/cm³);

U_t: umidade total do solo.

3.2.2.2 Análise Granulométrica

Ensaio de Peneiramento Via Úmido

Montou-se o conjunto de peneiras para o ensaio, seguido por peneira de aproximadamente dois mm, peneira de menor abertura do ensaio e balde. Os torrões de solo foram esfregados e desagregados com água na peneira de dois mm para não sobrecarregar a peneira de menor abertura.

Com o material retido na peneira de menor abertura também foi feita a mistura com água revolvendo a amostra para facilitar a passagem das partículas pela abertura. Procedeu-se desta forma até visivelmente perceber que a água arraste toda a fração passante. O material retido foi seco e peneirado novamente.

Tratamento dos Resultados

A massa da fração passante foi obtida através da relação entre as massas das frações retidas em cada peneira e a massa inicial por:

$$\%deA = \frac{M_1}{M} * 100 \quad \text{Eq.: 19}$$

O cálculo do percentual acumulado se obtém somando o percentual retido em cada peneira às percentagens retidas nas peneiras de aberturas maiores.

3.2.2.3 Limite de Liquidez

Preparação da Amostra

A amostra de solo a ser ensaiada é seca previamente e colocada na capsula de porcelana, onde adiciona-se água destilada em pequenos incrementos, logo depois é amassada e revolvida vigorosa e continuamente com o auxílio da espátula até que se obtenha uma amostra homogênea com consistência tal que sejam necessários cerca de 35 golpes para fechar a ranhura. O tempo total de homogeneização deve compreender entre 15 e 30 minutos.

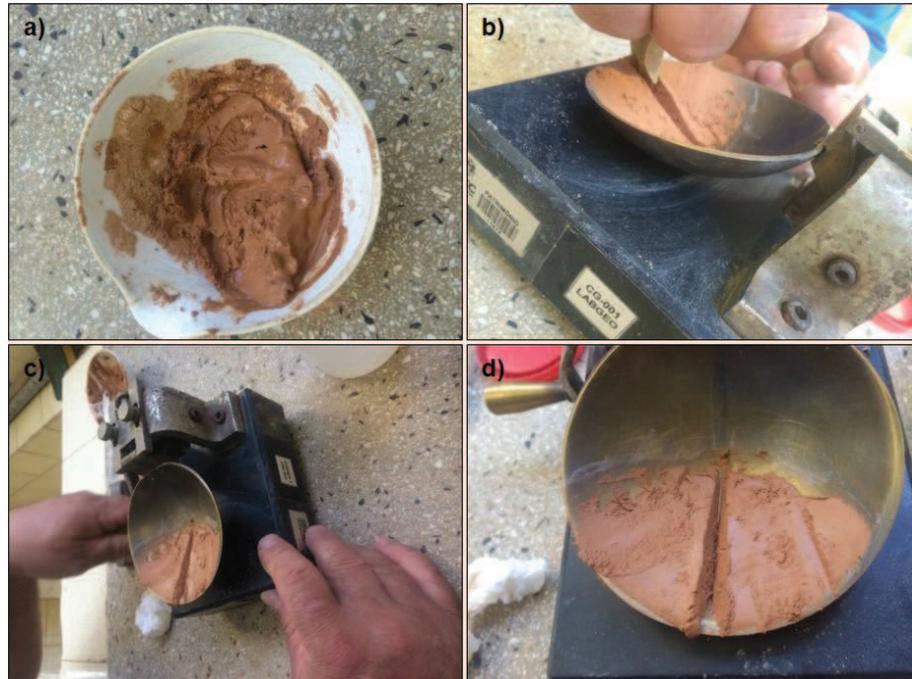
Ensaio de Liquidez

A amostra de solo é transferida para a concha do aparelho Casagrande e moldada de forma que na parte central a espessura seja da ordem de 10 mm, tomando o cuidado para que não se criem bolhas de ar no interior da mistura.

Na concha, a massa de solo foi dividida em duas partes, passando o cinzel através da mesma de maneira a abrir uma ranhura em sua parte central. A seguir, a concha é golpeada contra a base do aparelho, caindo em queda livre, girando a manivela à razão de duas voltas por segundo. Registra-se o número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se unam ao longo de 13 mm de comprimento aproximadamente.

Uma pequena quantidade do material das bordas que se uniram foi transferida para o recipiente onde se determinou a umidade do solo. O restante da amostra foi transferido para a cápsula de porcelana onde o ensaio se repete ao se adicionar mais água e homogeneizar a amostra por pelo menos três minutos. A operação foi repetida até obter-se 5 pontos de ensaio, cobrindo o intervalo de 15 a 35 golpes (Figura 12).

Figura 12 a - d) - Ensaio de caracterização física (Limite de Liquidez) realizado na amostra 01 em laboratório.



Fonte: GARCIA (2013).

Tratamento dos Resultados

Com os resultados obtidos construiu-se um gráfico no qual as abscissas, em escala logarítmica, são os números de golpes e as ordenadas, em escala aritmética, são os teores de umidade correspondentes e ajustou-se a reta pelos pontos. Da reta, o teor de umidade correspondente a 25 golpes é o limite de liquidez do solo.

3.2.2.4 Limite de Plasticidade

Preparo da Amostra

A amostra de solo a ser ensaiada é seca previamente e colocada na cápsula de porcelana, onde se adiciona água destilada em pequenos incrementos, logo depois é amassada e revolvida vigorosa e continuamente com o auxílio da espátula até que se obtenha uma amostra homogênea de consistência plástica. O tempo total de homogeneização deve compreender entre 15 e 30 minutos, utilizando-se intervalo de tempo maior para solos argilosos.

Ensaio de Plasticidade

Da amostra tomou-se 10 g que foram moldados na forma de uma pequena bola e amassada enrolando-a sobre uma placa de vidro com pressão suficiente da palma da mão para formar um cilindro. Se a amostra se fragmentar antes de atingir o diâmetro de 3 mm ela retorna à capsula de porcelana onde adiciona-se mais água e homogeneíza-se durante aproximadamente 3 min, repetindo o processo até formar um cilindro de 3 mm sem se fragmentar.

Ao se fragmentar o cilindro com diâmetro de 3 mm e comprimento de 100 mm, verificados através do gabarito de comparação, a amostra é transferida imediatamente para o recipiente adequado para determinação da umidade. O processo foi repetido de modo a se obter pelo menos três valores de umidade.

Determinação do Limite de Plasticidade

Consideram-se satisfatórios os valores de umidade obtidos quando, de pelo menos três resultados, nenhum deles diferir da respectiva média de mais de 5% dessa média. O resultado final tido como a média de pelo menos três valores satisfatórios é expresso em porcentagem. O índice de plasticidade (IP) da amostra deve ser calculado através da subtração do limite de plasticidade (LP) pelo limite de liquidez (LL), assim:

$$IP = LL - LP \qquad \text{Eq.: 20}$$

3.2.2 Ensaio de Caracterização Mecânica

Compactação da Amostra

O molde onde a amostra de solo será compactada é fixado à base metálica, ambos apoiados em uma base plana e firme. A amostra de solo é compactada dentro do molde com fundo falso em três camadas com o auxílio do disco espaçador. Cada camada deve cobrir aproximadamente um terço do molde e a compactação é realizada através de golpes de soquete manual que caem de uma altura de 30,5 cm distribuídos uniformemente sobre a superfície das camadas.

Removendo-se a base metálica e o cilindro complementar utilizado na compactação da terceira camada nivela-se a superfície da amostra à mesma altura do cilindro utilizando a régua biselada. A primeira medida de massa compreende o

peso da amostra de solo úmido mais o peso do cilindro. O procedimento de compactação da amostra é ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Ensaio de compactação realizado em amostra de solo da jazida de material de empréstimo.



Fonte: GARCIA (2013).

Cabe destacar que a partir da amostra compactada foram realizados os ensaios de permeabilidade, executados no Laboratório do SENAI.

3.2.3.1 Compactação Proctor Normal

Descompactação da Amostra

O corpo de prova foi removido do cilindro utilizando-se um extrator. Do cilindro é retirada uma amostra representativa de 100 g para a determinação da umidade. A amostra foi pesada obtendo-se o valor de massa (P_h) e seca em estufa até atingir uma consistência de peso (P_s) realizando as pesagens com aproximação de 1 kg (Figura 14).

Figura 14 - Descompactação e secagem de amostra de solo em estufa realizadas em Ensaio Proctor Normal.



Fonte: GARCIA (2013).

O material foi desmanchado até atingir uma granulometria de 4,8 mm. Adicionou-se água na amostra a uma quantidade da ordem de 2% em peso da massa original do solo e homogeneizou-se a amostra.

O ensaio foi repetido com teores crescentes de umidade até atingir um peso máximo (P_h) percebido quando o peso depois de ter subido, já tenha caído em pelo menos duas operações sucessivas para caracterizar a curva de compactação. Foram necessárias cinco determinações para se caracterizar uma curva para o ensaio.

Tratamento dos Resultados

Considerando ser h o teor de umidade em porcentagem, P_h o peso do solo úmido e P_s o peso do solo após a secagem, determinou-se os teores de umidade para cada compactação por:

$$h = \left(\frac{P_h - P_s}{P_s} \right) * 100$$

Eq.: 21

A massa específica aparente do solo úmido compactado após cada compactação foi calculada pela relação entre o peso do solo úmido compactado e o volume da amostra de solo por:

$$\mu_h = \frac{Ph}{V} \quad \text{Eq.: 22}$$

A massa específica aparente do solo seco foi determinada pela relação entre a massa específica aparente do solo úmido e o teor de umidade do solo compactado por:

$$\mu_s = \mu_h * \frac{100}{100 + h} \quad \text{Eq.: 23}$$

Obteve-se a curva de compactação marcando-se em ordenadas, as massas específicas de solo seco (μ_s) e, em abscissas os teores de umidade correspondentes (h).

A massa específica aparente máxima do solo seco é determinado pela ordenada máxima da curva de compactação.

A umidade ótima dá-se pelo valor da abscissa correspondente, na curva de compactação ao ponto de massa específica aparente máxima de solo seco.

3.2.4 Ensaio de Infiltração - Método dos Anéis Concêntricos

3.2.4.1 Instalação dos Anéis Concêntricos

No local determinado para a realização do ensaio o cilindro maior foi enterrado no solo através de golpes de marreta sobre um caibro de madeira fazendo-o penetrar aproximadamente 10 cm no solo. Seguindo o mesmo método, o anel menor foi enterrado no solo dentro do anel maior de forma concêntrica. Duas réguas graduadas foram fixadas na parede de cada cilindro e presas com uma fita transparente. Uma lâmina de plástico forrou o cilindro pequeno de forma ajustada ao solo e a parede do cilindro (Figura 15).

Figura 15 - Instalação dos anéis concêntricos e régua de medição.



Fonte: GARCIA (2013).

Tal metodologia permite a determinação da velocidade de infiltração básica (VIB) em (cm/h), classificando o solo conforme a proposta da CIENTEC de Viçosa (Tabela 04).

Tabela 03 - Classificação do solo segundo a 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 (2012).

3.2.4.2 Adição de Água nos Anéis

Adicionou-se água no cilindro interno até que se formasse uma lâmina d'água de aproximadamente 7,5 cm de altura. Aplica-se água no espaço existente entre os cilindros até que se forme uma lâmina d'água de aproximadamente 5 cm, mantendo o nível do anel externo a baixo do anel interno.

3.2.4.3 Leitura da Lâmina de Água Infiltrada

Retira-se o plástico do anel interno acionando o cronômetro no mesmo momento. Considerando ser este o tempo zero, fez-se a primeira leitura da lâmina

d'água na régua registrando o primeiro valor de nível de água em (cm). Para cada intervalo de tempo realizou-se nova leitura. No intervalo em que a lâmina infiltra mais que 50% do valor inicial faz-se a leitura da lâmina e a reposição da água até atingir o nível inicial de 7,5 cm, dando continuidade ao ensaio (Figura 17).

Figura 16 - Leitura da lâmina de água infiltrada.



Fonte: GARCIA (2013).

O ensaio é finalizado quando as últimas três leituras estiverem estabilizadas, ou quando o mesmo cumprir um tempo total de seis horas. Os valores de altura da lâmina d'água e período de tempo de infiltração foram registrados na ficha de campo.

3.2.4.4 Tratamento dos Resultados

A partir dos resultados registrados em campo o volume infiltrado durante intervalos temporizados é convertido para uma taxa de infiltração expressa em cm por hora. Dois gráficos são plotados, contendo no primeiro a lâmina d'água infiltrada em função do intervalo de tempo e no seguinte a lâmina acumulada em função do intervalo de tempo.

A velocidade de infiltração (V) foi calculada dividindo-se a lâmina acumulada (L) desde o início do ensaio até a sua estabilização ou após seis horas de ensaio expressa por (t), através da equação:

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Eq.: 24}$$

3.2.5 Ensaio de Rebaixamento

3.2.5.1 Espessura da Camada Argilosa

Previamente a instalação do equipamento de ensaio realizou-se um furo pioneiro na área compreendida em um raio de dois metros de cada ponto a fim de se determinar a espessura da camada de solo e a profundidade média dos furos de instalação do tubo de rebaixamento. A partir dos dados observados no trado identificou-se a camada argilosa de espessura média de 30 cm (Figura 17).

Figura 17 - Determinação da espessura da camada de solo com trado manual (a, b, c, d).



Fonte: GARCIA (2013).

3.2.5.2 Instalação do Tubo

A instalação do tubo de análise é realizada em um furo de profundidade de 20 cm definido através da análise da espessura da camada de argila. O tubo é inserido no furo até uma profundidade de 10 cm, restando ainda outros 10 cm de furo sem revestimento durante o ensaio. Um furo de diâmetro de 7 cm, compatível com o diâmetro do tubo, é feito com trado e raspado com espátula para garantir que o tubo se mantenha completamente em contato com o solo durante o ensaio e que por

tanto, a água infiltrada não aflore ou vaze através do furo. O tubo inserido no furo cavado recebe uma camada de proteção de argila na superfície em que perde o contato com o solo isolado. O trecho do ensaio corresponde ao intervalo entre a posição do nível de água e o fundo do furo ensaiado.

3.2.5.3 Saturação do Solo

O trecho do ensaio é completamente preenchido com água antes que se aguarde pelo processo de saturação do solo em intervalo compreendido entre 10 e 20 minutos. Após o tempo necessário à saturação do solo verificou-se estabilidade no nível de água infiltrada, a partir daí procedeu-se o ensaio com a manutenção de água no tubo (Figura 18).

Figura 18 - Tubo preparado para a saturação do solo.



Fonte: Do autor (2014).

3.2.1 Preparação das Amostras

As amostras extraídas da jazida de empréstimo (Afloramentos 01 e 03) foram acondicionadas em sacos plásticos, com capacidade de aproximadamente 25 kg, e encaminhadas ao Laboratório de Geotecnia da SATC para confecção de ensaios. No laboratório as amostras foram homogeneizadas e quarteadas, sendo secadas em estufa e armazenadas em sacos plásticos com capacidade de dois kg.

Cada sub-amostra foi destinada a ensaio físico, sendo submetidas a um novo quarteamento antes da realização do ensaio.

A Figura 19 mostra a etapa de quarteamento realizada em amostra de um kg a ser utilizada em ensaio de compactação.

Figura 19 - Processo de quarteamento da amostra de solo utilizada em ensaio de compactação.



Fonte: GARCIA (2013).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS

4.1.1 Jazida de Empréstimo

A jazida localizada na área Rio Capivaras Alto (Figura 20) apresenta geologia caracterizada a partir de quatro afloramentos (01, 02, 03 e 04) formados por cortes de extração de material de empréstimo para reabilitação ambiental da área denominada “Zona 4”, próxima mesma. É pertencente à formação estratigráfica Rio Bonito - Membro Siderópolis.

Figura 20 - Corte de extração de material de empréstimo formador do primeiro afloramento.



Fonte: GARCIA (2013).

A litologia da amostra 01 (Afloramento 01) é descrita como arenito de cor avermelhada devido à oxidação, médio a grosso, quartzoso, com matriz siltica, friável. A amostra 02 (Afloramento 01) é descrita como siltito argiloso, cinza claro com manchas rosadas e amareladas por oxidação. A amostra 03 (Afloramento 03) apresenta-se como arenito de cor cinza claro com manchas avermelhadas por oxidação, fino a grosso quartzoso, intercalado com leitos de 10 a 20 cm de siltito

cinza claro maciço. A amostra 04 (Afloramento 03) é caracterizada por siltito de cor rosada a bordô com manchas amareladas por oxidação (GARCIA, 2013).

O perfil geológico do afloramento 01 apresenta no intervalo de 0,80 m à 1,90 m, camada de arenito médio a grosso de cor avermelhada por oxidação, quartzoso, friável, matriz síltica, ocorrência de concreções de óxidos de ferro concordantes com estratificação. O segundo intervalo de 1,90 m à 5,50 m exhibe camada siltito argiloso cinza claro com manchas rosadas e amareladas por oxidação, laminação plano-paralela irregular a ondulada com leitos de 2 até 10 mm intercalados com leitos maciços de siltito com até 20 cm de espessura, raros nódulos oxidados de pirita.

O afloramento 02, de perfil geológico semelhante ao primeiro afloramento é formado por sequência de arenitos e siltitos de baixa plasticidade com estratificação plano paralela. Apresenta no primeiro intervalo camada de solo arenoso, marrom, friável. No intervalo compreendido entre 1,00 m e 1,80 m a camada é formada por siltito marrom escuro, provável intervalo estratigráfico da camada Treviso. No intervalo entre 1,80 m e 4,00 m a camada é formada por arenito fino a médio, cinza claro, maciço, friável com manchas rosadas por oxidação. O último intervalo localizado entre os 4,00 m e 5,00 m a camada é formada por siltito cinza amarelado por oxidação com laminação plano-paralela e ondulada.

O afloramento 03 apresenta sequência de arenito fino a médio, cinza claro, friável, intervalado com leitos de 10 a 20 cm de espessura de siltito maciço cinza claro no intervalo compreendido entre 1,10 m e 3,40 m. Observa-se variação lateral nesta camada passando para arenito fino a médio, rosado (0,8 a 2,0 m), friável no lado esquerdo do afloramento. Segue-se no intervalo entre 3,40 m e 4,40 m camada de siltito cinza claro, maciço com manchas amarelas por oxidação. Observa-se variação lateral nesta camada passando para siltito rosado por oxidação com manchas amarelas (2,0 a 5,5 m) no lado esquerdo do afloramento.

O afloramento 04, de perfil geológico semelhante ao observado no primeiro afloramento apresenta sequência de solo arenoso, marrom claro, friável no primeiro intervalo localizado até os 0,40 m. Siltito cinza claro, maciço com manchas de cor bordô por oxidação preenchendo juntas verticais no intervalo entre 0,40 m e 2,10 m. Arenito médio, cinza amarelado por oxidação, maciço, consistente no intervalo entre 2,010 m e 2,40 m. Siltito cinza claro, maciço com manchas de cor

bordô por oxidação preenchendo juntas verticais entre os 2,40 m e 5,50 m e siltito cinza claro, maciço no intervalo de 4,20 m e 5,50 m.

4.1.2 Área de Estudo

Neste trabalho foram realizados ensaios de investigação em uma Área de Estudo que compreende cerca de 09 hectares, definida no interior da Zona 4 (40,04 ha), que corresponde a uma antiga lavra a céu aberto pela mineração de carvão em processo de reabilitação ambiental, localizada às margens da estrada que perfaz o caminho entre a sede do Distrito do Guatá e a comunidade de Capivaras Alto, interior do município de Lauro Müller. Atualmente a área passa por trabalhos de recuperação ambiental.

Informações da extinta Companhia Nacional de Mineração de Carvão do Barro Branco, indicam que a Zona 4 foi minerada pelo método céu aberto, entre os anos de 1984 e 1989, referente a Camada Barro Branco. De início, haviam duas minas distintas na área, Fonseca e Fontanella, que se uniram, resultando na Zona 4. A mineração foi desenvolvida parcialmente pela empresa Barro Branco, bem como por algumas empreiteiras, sendo a mais relevante a Engepasa. O carvão era transportado por caminhões para o antigo lavador Boa Vista, situado ao sul do Distrito do Guatá, nas margens do rio Rocinha (GARCIA, 2013).

5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

5.2.1 Jazida de Empréstimo

Os ensaios de caracterização física nas amostras de material argiloso compreenderam testes de granulometria e limites de consistência. A caracterização granulométrica tem por finalidade o reconhecimento do tamanho e da distribuição dos grãos em uma amostra, que influencia na compactação visto que esta depende fundamentalmente da interação existente entre as partículas.

Os limites de consistência ensaiados em solos argilosos compreendem os ensaios de limites de plasticidade e liquidez. Ambos os ensaios têm a finalidade de determinar o teor de umidade máximo para o qual o solo mantenha as características de plasticidade. O índice de consistência é a relação entre a

diferença do limite de liquidez e a umidade do solo e o índice de plasticidade. Os ensaios de caracterização física bem como a classificação do solo são apresentados na Tabela 05.

Tabela 04 - Caracterização física das amostras de solo da jazida de empréstimo.

Amostra	Limite de Plasticidade (% UT)	Limite de Liquidez (%UT)	Índice de Plasticidade (%)	Granulometria passante # 200 (%)	IG	TRB	SUCS
01	26	35	9	100	??	A4	CL
02	31	67	36	100	??	A7-5	CH
03	21	33	12	100	??	A6	MH
04	30	54	24	100	??	A7-5	CH

Fonte: GARCIA (2013).

Segundo o sistema de classificação H.R.B o solo com percentual mínimo passante na peneira 200 é maior que 35%. Todas as amostras caracterizadas, bem como devem ser os solos argilosos, se classificam como solos finos subdivididos nos grupos (A-4, A-5, A-6 e A-7). O solo da amostra 01 enquadra-se no grupo A4 que identifica o solo como siltoso, não-plástico ou de baixa plasticidade. A classificação A4 é uma das principais características de siltes e argilas de baixa plasticidade. Conforme consta no gráfico de plasticidade da SUCS, a amostra 01 cujos valores de IP encontram um ponto acima da linha A, é classificada como solo argiloso pouco plástico, pertencente ao grupo (CL). Estando este mesmo ponto situado a margem esquerda da linha B do gráfico considera-se um indicativo de solo de baixa compressibilidade e média a baixa plasticidade. Este solo é considerado pela classificação SUCS um solo impermeável quando compactado, de resistência regular e compressibilidade média com más características de drenagem.

As amostras 02 e 04 são enquadradas no grupo A7-5 que os classificam como solos argilosos, elásticos, com moderado LP em relação ao LL. O grupo A7-5 compõe as características de solos da grande maioria das argilas inorgânicas e solos orgânicos. As amostras 02 e 04 situadas sobre a linha A do gráfico de plasticidade e a direita da linha B, indicam solos de textura argilosa muito plástica e compressível pertencente ao grupo (CH). Este solo é considerado impermeável quando compactado, de alta resistência, baixa compressibilidade e más condições de drenagem.

A amostra 03 que representa solos do grupo A6 é classificada como solo argiloso que pode incluir misturas argilo-arenosas com até 64% de areia e pedregulhos, sujeita a grandes variações volumétricas. Compõe basicamente solos

compostos por argilas inorgânicas de média e baixa plasticidade. Situada abaixo da linha A do gráfico de plasticidade e a direita da linha B a classificação SUCS indica um solo caracterizado como silte elástico pertencente ao grupo (MH). Quando compactado se torna semipermeável ou permeável, resistência baixa a regular, alta compressibilidade e condições de drenagem de regulares a más.

Quando se compara os resultados em termos de características de solos das quatro amostras ensaiadas em relação à NBR 6502/1995, pode-se dizer que as amostras 02, 03 e 04 apresentam comportamento de solos argilosos, com características marcantes de plasticidade, quando suficiente úmido, moldando-se facilmente em diferentes formas, e quando seco, a coesão é suficiente para construir torrões dificilmente desagregáveis por pressão dos dedos. Estas três amostras também se caracterizam pela sua plasticidade, textura e consistência em seu estado e umidade naturais.

A amostra 01 caracteriza-se por solos siltosos com baixa ou nenhuma plasticidade, baixa resistência quando seco ao ar, tendo suas propriedades dominantes devidas à parte construída pela fração silte.

Importante destacar que a utilização da classificação do sistema H.R.B utilizado neste trabalho correspondem a classificação de solos para impermeabilização, conforme citado por Pazzetto (2009).

5.1.2 Área de Estudo

Os testes de densidade do solo “*in situ*” através do cone de areia permitiu indicar a densidade relativa do solo compactado na área em processo de recuperação (Tabela 06).

Tabela 05 - Resultados de densidade in situ das amostras de solo em campo.

Ponto	Densidade In Situ (g/cm ³)
Pt01	1,52
Pt02	1,33
Pt03	1,24
Pt04	1,78
Pt05	1,17
Pt06	1,32
Pt07	1,54
Média	1,41
Desvio Padrão	0,21

Fonte: GARCIA (2013).

Pode-se dizer que a densidade dos pontos amostrados indica que a camada de solo de aproximadamente 30 cm manteve-se uniforme na área de estudo, conforme mostra o desvio padrão.

5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

O ensaio de compactação fixa o modo pelo qual se determina a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo, compactado com energia determinada. O ensaio de compactação Proctor Normal permite a definição de um valor de umidade ideal para o qual o solo atinja o maior nível de compactação possível. Os resultados das análises mecânicas obtidas através de ensaios laboratoriais são apresentados na Tabela 07.

Tabela 06 - Valores de densidade seca máxima e umidade ótima para as amostras ensaiadas em laboratório da jazida de empréstimo.

Ensaio Mecânico de Compactação						
Amostras	01	02	03	04	Média	Desvio Padrão
Densidade seca máxima (g/cm ³)	1,71	1,42	1,64	1,42	1,55	0,15
Umidade Ótima	18,7	29,65	20,5	29,45	24,57	5,79

Fonte: GARCIA (2013).

Os resultados obtidos no ensaio Proctor Normal indicam que a compactação do solo na amostra 01 não chegou ao teor máximo com resultado de 93%. Foi encontrado o resultado de 98% para as amostras 03 e 04 e 101% para a amostra 04. Isso significa que a amostra 01 poderia ter atingido um valor de densidade maior.

A análise dos ensaios de compactação nas amostras ensaiadas permite dizer que o solo atinge sua densidade máxima quando compactado com teor de umidade médio de 24,57%, observando-se valores relativos determinados para cada amostra que variam de 1,42 a 1,71 g/cm³. Para tais condições as amostras de solo atingem a densidade média de 1,55 g/cm³.

Quando se compara os resultados médios dos ensaios de densidade in situ (1,41 g/cm³) com os de densidade máxima em laboratório (1,55 g/cm³), verifica-se proximidade entre as densidades ensaiadas, o que permite induzir que as condições alcançadas em termos de compactação do solo da Área de Estudo estão

próximas de um nível de compactação e densidade ideal, conforme constatados nos resultados em laboratório das amostras moldadas.

5.3 ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - MÉTODO DOS ANÉIS CONCÊNTRICOS

O ensaio de infiltração através dos cilindros concêntricos consiste na medição direta da relação altura de lâmina d'água infiltrada versus tempo de infiltração no solo. Esta leitura permite a definição da taxa de velocidade de infiltração Básica (VIB), sugerida pela metodologia da CIENTEC. Os resultados obtidos para a VIB dos pontos ensaiados são apresentados na Tabela 08.

Tabela 07 - Classificação do solo dos pontos ensaiados segundo a Velocidade de Infiltração Básica – VIB.

Ponto	Infiltração VIB (cm/h)	Infiltração VIB (cm/s)	Classificação VIB
Pt01	0,1	2,77778E-05	Baixa
Pt02	0,1	2,77778E-05	Baixa
Pt03	0,1	2,77778E-05	Baixa
Pt04	0,1	2,77778E-05	Baixa
Pt05	0,1	2,77778E-05	Baixa
Pt06	0,1	2,77778E-05	Baixa
Pt07	0,1	2,77778E-05	Baixa
Média	0,1	2,77778E-05	-
Desvio Padrão	0,0	0,0	-

Fonte: CIENTEC (2009).

O ensaio de infiltração com cilindros concêntricos apresentou em um primeiro momento uma taxa de infiltração elevada que se deve ao fato do solo não estar saturado no início do ensaio. Ao longo do procedimento esta taxa diminui atingindo um ponto de estabilização. Dos valores constantes analisados através do ensaio se obtém a taxa de infiltração média. Os ensaios com cilindros concêntricos realizados na área de estudo identificaram VIB baixa para todos os pontos ensaiados.

5.4 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

O ensaio de permeabilidade realizados nas amostras extraídas da jazida de empréstimo (amostras moldadas) representa o coeficiente de permeabilidade em condições de compactação ideal. Os resultados constam na Tabela 09.

Tabela 08 - Permeabilidade das amostras da jazida de empréstimo em laboratório.

Amostra	Permeabilidade - K (cm/s)
01	2,98E-05
02	3,72E-07
03	5,20E-07
04	4,10E-07
Média	7,78E-06
Desvio Padrão	1,47E-05

Fonte: GARCIA (2013).

Condizente com os ensaios de infiltração, as amostras moldadas foram classificadas conforme o coeficiente de permeabilidade proposto por Soares e Tavares (2006) em silte e argila de permeabilidade Baixa.

A permeabilidade da Amostra 01 teve resultado inferior às demais amostras, fato este devido ao baixo resultado de densidade do ensaio Proctor Normal. Este comportamento deve ter relação às características físicas da Amostra 01 classificada como siltoso. As demais amostras apresentaram k baixo conforme proposto por Soares e Tavares (2006), devido as amostras terem características silte-argilosas.

Com relação aos resultados da permeabilidade com o teste de rebaixamento e com permeâmetro de carga constante (amostra indeformada) na área de estudo (Tabela 10), pode-se constatar que ambos os métodos apontam a impermeabilização do solo (média 8,50E-08 teste rebaixamento e 8,85E-07 – permeâmetro de carga constante). Estes resultados corroboram com a VIB (baixa) identificada nos mesmos pontos.

Tabela 9 - Resultados obtidos através dos ensaios de campo para infiltração e densidade.

Ponto	¹ Permeabilidade Rebaixamento (cm/s)	² Permeabilidade - K (cm/s) (Am. indeformada)
Pt01	2,22E-07	3,43E-08
Pt02	2,01E-07	1,68E-06
Pt03	7,78E-08	0,00E+00
Pt04	1,39E-08	5,54E-07
Pt05	1,31E-08	2,11E-06
Pt06	2,58E-08	2,00E-07
Pt07	4,17E-08	1,62E-06
Média	8,50E-08	8,85E-07
Desvio Padrão	8,93E-08	8,77E-07

¹ ABGE (2009);

² GARCIA (2013).

Os testes de permeabilidade através do método de rebaixamento obtiveram coeficiente de permeabilidade médio mais elevado em cinco dos seis pontos ensaiados. Estes valores se devem a profundidade da amostra de solo

analisada. O método de rebaixamento possibilita a análise da camada argilosa a uma profundidade de 10 à 30 cm onde o solo é mais compactado e o ensaio não sofre interferência da camada superficial menos densa. As amostras indeformadas foram extraídas da camada superficial do solo contemplando uma profundidade de até 10 cm onde o solo é menos denso.

Com relação à classificação do solo pelo método de rebaixamento, podem-se constatar solos argilosos de permeabilidade muito baixa. No caso das amostras indeformadas, a classificação deu-se como siltoso e argiloso, de permeabilidade baixa a muito baixa, devido ao fato de ter influência da camada superficial do solo.

7 CONCLUSÃO

A litologia dos afloramentos da jazida de empréstimo mostrou que os solos são provenientes de arenito (cores avermelhada e cinza claro) e de siltito argiloso (cinza claro e rosada a bordo), característicos de solos da formação Rio Bonito (Membro Siderópolis).

Os ensaios de caracterização física e mecânica realizada na camada de baixa permeabilidade sobre os rejeito de mineração de carvão da área de estudo junto a Zona 04, em processo de reabilitação ambiental permitem dizer que o material proveniente da jazida de empréstimo caracteriza-se como argiloso e silte-argiloso, apresentando a classificação da permeabilidade k como impermeável e semipermeável.

A característica geotécnica das amostras dos afloramentos segundo a classificação H.R.B enquadrou os solos nos grupos A-4 (siltoso, não-plástico ou de baixa plasticidade), A7-5 (argilosos e elásticos, com grandes características de argilas inorgânicas) e A-6 (argilo-arenosas). A classificação SUCS indicou o solo da amostra 01 como argiloso pouco plástico, das amostras 02 e 04 (textura argilosa muito plástica) e amostra 03 (silte elástico).

Quando se compara os testes de compactação (Proctor Normal) e densidade máxima em laboratório com as densidades de campo, pode-se constatar valores próximos aos níveis considerados ideais para que se cumpra a proposta do projeto de recuperação ambiental da Zona 04, no que tange à impermeabilização do solo.

As medições de permeabilidade utilizando o método de rebaixamento (in situ) e o permeâmetro de carga constante (amostras indeformadas) permitem considerar que ambos apresentam boa representatividade, mostrando confiabilidade nos resultados. Importante destacar, que o método de rebaixamento para ensaios de campo, mostrou-se de fácil execução, praticidade e precisão das leituras, especificamente sobre áreas em processo de recuperação ambiental por passivos de mineração de carvão.

Os ensaios com anéis concêntricos, embora indicassem resultados satisfatórios em termos de VIB, tiveram maior dificuldade na execução, uma vez que necessitam maior tempo devido à estabilização da velocidade de infiltração, além de

que a precisão dos resultados não permite diferenciar a VIB entre os pontos analisados.

Tendo como referência os resultados pontuais dos ensaios de permeabilidade (campo e laboratório), pode-se considerar que a camada de baixa permeabilidade utilizada na área de estudo atende aos critérios de permeabilidade proposto pelo GTA.

Ressalta-se a vantagem do método de rebaixamento sobre o método dos cilindros concêntricos, uma vez que este permite avaliar k em maior profundidade, enquanto os cilindros apenas a VIB. Importante frisar que a existência de vegetação e material palhoso sobre a superfície do solo exerce influência nos resultados dos ensaios de infiltração (anéis concêntricos), podendo interferir na avaliação da VIB.

Para trabalhos futuros sugere-se testar outros métodos de campo para determinação da permeabilidade visando maior facilidade e praticidade.

REFERÊNCIAS

- ABGE (1996). **Ensaio de permeabilidade em solos – Orientações para sua execução**. Coordenação Antonio Manuel dos Santos Oliveira e Diogo Correa Filho – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, SP – Boletim 04, (3ª Edição Revisada)
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. 2 ed. Rio de Janeiro: 2004. 71 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896: Aterros de Resíduos Não Perigosos - Critérios para Projeto, Implantação e Operação**. Rio de Janeiro: 1997. 12 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10157: Aterros de resíduos perigosos - Critérios Para Projeto, Construção e Operação - Procedimento**. Rio de Janeiro: 1987. 13 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro: 2000. 12 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: 1984. 6 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: 1984.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: 1986.
- ALEXANDRE, Nadja Zim. Diagnóstico Ambiental da Região Carbonífera de Santa Catarina: Degradação dos Recursos Naturais. **Tecnologia e Ambiente**, Criciúma, v. 5, n. 2, p.35-50, jul. 1999.
- BELLOLLI, Mário; QUADROS, Joice; GUIDI, Ayser. **História do Carvão de Santa Catarina : 1790-1950**. Criciúma: loesc, 2002. 296 p.
- BELLOLLI, Mário; QUADROS, Joice; GUIDI, Ayser. **História do Carvão de Santa Catarina : 1950-2000**. Criciúma: loesc, 2010. 313 p.
- 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. **Critérios Para Recuperação ou Reabilitação de Áreas Degradadas pela Mineração de Carvão**. Revisão 06. Criciúma, abr. 2013.
- 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, nov. 2013. 192 p.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1996.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (2001). Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense. RT 33/2000. **Relatório Técnico elaborado para o Siecesc**. Volume I, Revisão 01, Janeiro, 2001. Disponível na página da internet: http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/volume_001.pdf Acesso em: 25/09/2014.

CIENTEC. **Infiltração da Água no Solo**. Disponível em: http://www.cientec.net/cientec/InformacoesTecnicas_Irriga/Solo_Infiltracao.asp Acesso em: 02/10/2014.

CITADINI-ZANETTE, Vanilde. Diagnóstico Ambiental da Região Carbonífera no Sul de Santa Catarina: Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração do Carvão. **Tecnologia e Ambiente**, Criciúma, v. 5, n. 2, p.51-61, jul. 1999.

DAS, Braja M.. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson, 2007. 561 p.

DE LUCA, Francisco Javier; GASTALDON, Murialdo Canto. Desenvolvimento Sustentável e a Recuperação das Áreas Degradadas Abandonadas pela Mineração do Carvão na Região Sul do Estado de Santa Catarina. **Tecnologia e Ambiente**, Criciúma, v. 5, n. 2, p.19-33, jul. 1999.

GALATTO, S.L. Avaliação da eficiência de coberturas secas sobre rejeito de carvão visando a prevenção da drenagem ácida de mina. Dissertação Mestrado. Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma. 129 p., 2006.

GARCIA, Denise Olímpio Ugioni. **Ensaio de Infiltração e Permeabilidade: Estudo Comparativo Entre os Dois Métodos e Análise da Sua Representatividade na Aferição da Eficácia da Impermeabilização das Camadas de Cobertura de Áreas Degradadas Pela Mineração de Carvão**. Criciúma: 2013. 25 p.14

MASSAD, Façal. **Obras da Terra : Curso Básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 169 p.

MILIOLI, Geraldo; SANTOS, Robson dos; CITADINI-ZANETTE, Vanilde. **Mineração de Carvão, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável no Sul de Santa Catarina: Uma Abordagem Interdisciplinar**. Curitiba: Juruá, 2009. 316 p.

PAZZETTO, M. B. **Estudo da Permeabilidade de Solos Argilosos Disponíveis para Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração de Carvão no Sul de Santa Catarina**. Trabalho de conclusão de curso. UNESC. Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma/SC, 2009. 98p.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 353 p.

POTT, Cristiano Andre. **Determinação da Velocidade de Infiltração Básica de Água no Solo Por Meio de Infiltrômetros de Aspersão, de Pressão e de Tensão Em Três Solos do Estado De São Paulo**. 2001. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agricultura Tropical, Instituto Agronômico, Campinas, 2001.

SILVA, Joseleide Pereira da. **Estruturas de Infiltração com Utilização de Materiais Alternativos no Controle de Alagamentos, Inundações e Prevenção de Processos Erosivos**. 2012. 235 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

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: 21/10/2014.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Ufrgs, 2004.

VARGAS, Milton. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Mcgraw-hill, 1977. 509 p.

VIGÂNICO, Eunice Maria. **Produção de Sulfato Ferroso a Partir de Rejeitos de Carvão**. 2009. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Laboratório de Estudos Ambientais Para Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

APÉNDICE(S)

APÊNDICE A - Localização dos Pontos de Amostragem na Área de Estudo