

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

FELIPE RUON MAESTRI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO QUÍMICO ESTABILIZANTE CON-AID®
CBR-PLUS® NAS PROPRIEDADES DE UM SOLO RESIDUAL DE GNAISSE
UTILIZADO COMO SUBLEITO DE VIAS PERMANENTES

Joinville

2018

FELIPE RUON MAESTRI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO QUÍMICO ESTABILIZANTE CON-AID®
CBR-PLUS® NAS PROPRIEDADES DE UM SOLO RESIDUAL DE GNAISSE
UTILIZADO COMO SUBLEITO DE VIAS PERMANENTES

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Ferroviária e
Metroviária do Centro Tecnológico de Joinville
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Marcelo Heidemann

Joinville

2018

FELIPE RUON MAESTRI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO QUÍMICO ESTABILIZANTE CON-AID®
CBR-PLUS® NAS PROPRIEDADES DE UM SOLO RESIDUAL DE GNAISSE
UTILIZADO COMO SUBLEITO DE VIAS PERMANENTES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Dr. Marcelo Heidemann
Orientador(a)
Presidente

Dra. Helena Paula Nierwinski
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à toda minha família, em especial aos meus pais, Almir e Lindamir, por terem me apoiado e incentivado durante a escolha de minha profissão e diversas outras, que me fizeram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, força e fé que me fizeram chegar até aqui.

Aos meus pais e irmã, Almir Maestri, Lindamir R. Maestri e Fernanda R. Maestri, por todo o amor, carinho, apoio e compreensão, durante toda minha vida e, principalmente, quando me distanciei apegando-me aos estudos.

A minha namorada Aydara C. Muniz, por todo carinho que me dedica e por ser meu porto seguro, também pela paciência e companheirismo durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Marcelo Heidemann, por toda orientação, dedicação e paciência durante a realização do presente trabalho.

Ao meu amigo Pedro Augusto G. Britto e ao geólogo Xavier Wichroski, por toda a ajuda durante a coleta de amostras do solo estudado.

Aos monitores de laboratório da Universidade Federal de Santa Catarina, Maria Eduarda Paul e Leonardo Turco, por toda orientação e auxílio durante a realização dos ensaios.

A empresa Con-Aid® CBR-Plus Brasil, por doar uma amostra do aditivo para confecção do trabalho.

A UFSC e todos os professores do curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária, por todo aprendizado e conhecimento obtido.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET) por toda capacitação obtida durante o tempo como bolsista.

A todos meus amigos e familiares em geral, que fazem parte do meu dia-a-dia, por toda amizade e apoio.

RESUMO

É comum, em obras da construção civil, a necessidade de realizar um tratamento adequado do solo, mudando suas características até que o mesmo alcance as propriedades físicas e mecânicas adequadas para o projeto. Em obras de pavimentação de rodovias e ferrovias, a técnica de tratamento do solo utilizada é a estabilização. Atualmente existe grande variedade de técnicas de estabilização do solo, entre as quais, está a estabilização química através do aditivo Con-Aid® CBR-Plus®. Produto químico atóxico que vem sendo comercializado no mercado nacional e, quando diluído em água e aplicado, possui resultados inovadores, como aumento da resistência natural e impermeabilidade do solo, e redução de formação de pó e lama. Para o projeto da superestrutura de uma ferrovia, onde o subleito deve suportar elevadas cargas provindas da superestrutura e material rodante, esses resultados são muito satisfatórios. A partir disso, este é um trabalho experimental, que tem como objetivo avaliar as mudanças presentes nas propriedades, físicas e mecânicas, de um solo residual da região de Joinville com o uso do aditivo químico estabilizante Con-Aid® CBR-Plus®, e assim, avalia-lo como subleito de pavimentos, com foco em ferroviários. Através dos ensaios de caracterização física nota-se que o solo é residual de gnaiss é predominantemente siltoso pertencente ao grupo A-5 no quadro HRB, considerado ruim quando utilizado como fundação de pavimentos. O solo aditivado apresentou melhorias como aumento de até 27 % no valor de ISC, e redução de 70 % da expansão. Essas melhorias são consideradas pequenas, o que é condizente com o baixo teor de argila presente neste solo residual (material que reage com o aditivo). Com isso, concluiu-se que, para este tipo de solo, a utilização do aditivo químico não altera as propriedades requeridas de modo que o torne satisfatório para utilização como subleito de pavimentos ferroviários. Porém, para solos mais argilosos, a tendência é que a utilização do produto se torne viável.

Palavras-chave: Solos. Estabilização Química. Con-Aid® CBR-Plus®. Via permanente. Pavimentação.

ABSTRACT

It's common, in construction works, the need to perform a proper treatment of the soil, changing its characteristics until it reaches the physical and mechanical properties suitable for the project. In paving works on highways and railways the soil treatment technique used is stabilization. Currently, there is a wide variety of soil stabilization techniques, including chemical stabilization through the Con-Aid® CBR-Plus® additive. A nontoxic chemical product that has been commercialized in the national market and, when diluted in water and applied, has innovative results, such as increase of natural resistance and soil impermeability, and reduces the formation of dust and mud. For the design of the superstructure of a railway, where the subgrade must withstand heavy loads from the superstructure and rolling stock, these results are satisfactory. By that, this is an experimental work, whose objective is to evaluate the changes in the physical and mechanical properties of a residual soil of Joinville's region with the use of the chemical stabilizer Con-Aid® CBR-Plus®, and thus, evaluates it as a pavement foundation, focusing in railways. The physical characterization tests shows that the gneiss residual soil is predominantly silty, belonging to group A-5 of the HRB, considered bad when used as foundation of pavements. The additive soil presented improvements such as up to 27% increase in CBR value, and a 70% reduction of expansion. These improvements are considered small, which is consistent with the low clay content present in this residual soil (material that reacts with the additive). Therefore, it was concluded that, for this type of soil, the use of the chemical additive does not alter the required properties in a way that renders it satisfactory for use as subgrade of railway pavements. However, for more clayey soils, the tendency is for the use of the product to become viable.

Keywords: Ground. Chemical Stabilization. Con-Aid® CBR-Plus®. Railroad. Paving

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Seção típica de um pavimento rodoviário.	24
Figura 2 - Seção transversal de um pavimento ferroviário.....	26
Figura 3 - Sistema de camadas em pavimentos rodoviários e ferroviários.	26
Figura 4 - Esquema de uma curva de compactação.....	33
Figura 5 - Fluxograma da metodologia empregada.....	36
Figura 6 - Mapa geológico do Brasil.	39
Figura 7 - Mapa com imagens de satélite do local de coleta das amostras.	40
Figura 8 - Foto da amostragem de solo residual.....	40
Figura 9 - Ilustração simbólica dos íons do Con-Aid® CBR-Plus.....	42
Figura 10 - Ilustração mostrando a ação de funcionamento do Con-Aid® CBR-Plus em partículas argilosas.	42
Figura 11 - Amostra de Con-Aid® CBR-Plus doada para pesquisa.	43
Figura 12 - Garrafas com líquido estabilizante em dosagens de 0,3% (a direita) e 0,45% (a esquerda) de Con-Aid® CBR-Plus diluído em água pura.....	45
Figura 13 - Foto do solo inserido na concha do aparelho de Casagrande e pronto para ser ensaiado.	46
Figura 14 – Solo moldado no ensaio de limite de plasticidade.	47
Figura 15 - Foto de dois picnômetros separados após o banho de água do ensaio de densidade real dos grãos.	49
Figura 16 - Foto da proveta durante o ensaio de sedimentação realizado.	51
Figura 17 - Foto dos materiais utilizados para o ensaio de compactação com cilindro grande.	52
Figura 18 - Foto do solo compactado por ensaio compactação em cilindro grande.	53
Figura 19 - Corpos de prova com solo aditivado, utilizados nos ensaios de ISC, durante o período de cura.	55
Figura 20 - Foto dos quatro corpos de prova ensaiados, com solo aditivado, durante o período de submersão em água.....	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quadro de Classificação Highway Research Board.....	30
Quadro 2 - Valores de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade obtidos para um solo residual gnaise.....	31
Quadro 3 - Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS).	32
Quadro 4 - Energias de Compactação Proctor.....	33
Quadro 5 - Experimentos realizados e suas respectivas normas técnicas tomadas.	38
Quadro 6 - Cronograma de ensaios realizados.	44
Quadro 7 - Resultados de Limites de Atterberg e índice de plasticidade para o solo residual de gnaise natural.	57
Quadro 8 - Resultados de Limites de Atterberg e índice de plasticidade para o solo residual de gnaise aditivado, com dosagem de 0,3% de Con-Aid [®] /CBR-Plus [®] em água.....	58
Quadro 9 - Resultados de Limites de Atterberg e índice de plasticidade para o solo residual de gnaise aditivado, com dosagem de 0,45% de Con-Aid [®] /CBR-Plus [®] em água.....	58
Quadro 10 - Resultados obtidos durante o ensaio de Densidade Real dos Grãos (DRG) para o solo natural.	59
Quadro 11 - Resultados para fração dos constituintes do solo, obtidos através da curva granulométrica.	60
Quadro 12 - Tabela que relaciona o tipo de solo, de acordo com a HRB, e o efeito esperado para a estabilização utilizando Con-Aid [®] /CBR-Plus [®]	62
Quadro 13 - Resultados obtidos para expansão do solo natural e aditivado.	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação entre altura de lastro e índice de suporte Califórnia.....	28
Gráfico 2 - Curva de compactação típica para um solo residual de Gnaisse para energia de compactação normal e intermediária.....	34
Gráfico 3 - Valores obtidos de ISC para amostras de solos residuais gnaisse da região de Joinville, com energias de compactação normal e intermediária.....	35
Gráfico 4 - Curva granulométrica para o solo residual de gnaisse estudado.....	60
Gráfico 5 - Curva de compactação com energia intermediária para o solo natural compactado em cilindro grande.....	63
Gráfico 6 - Curva obtida (corrigida) durante o ensaio de ISC com solo residual de gnaisse natural e energia intermediária.....	65
Gráfico 7 - Curva obtida durante o ensaio de ISC com solo aditivado (dosagem de 0,3 % de Con-Aid [®] /CBR-Plus [®] diluído em água) e curado sem rega.....	65
Gráfico 8 - Curva obtida durante o ensaio de ISC com solo aditivado (dosagem de 0,3 % de Con-Aid [®] /CBR-Plus [®] diluído em água) e curado com rega.....	66
Gráfico 9 - Curva obtida durante o ensaio de ISC com solo aditivado (dosagem de 0,45 % de Con-Aid [®] /CBR-Plus [®] diluído em água) e curado sem rega.....	66
Gráfico 10 - Curva obtida durante o ensaio de ISC com solo aditivado (dosagem de 0,45 % de Con-Aid [®] /CBR-Plus [®] diluído em água) e curado com rega.....	67
Gráfico 11 - Resultados de ISC obtidos para o solo residual de gnaisse, natural e aditivado, durante o trabalho.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ATR – Afundamento de Trilha de Rodas
- CBR – *California Bearing Ratio*
- CTJ – Centro Tecnológico de Joinville
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
- DRG – Densidade Real dos Grãos
- HRB – *Highway Research Board*
- ISC – Índice de Suporte Califórnia
- IP – Índice de Plasticidade
- LL – Limite de Liquidez
- LP – Limite de Plasticidade
- RCS – Resistência a compressão simples
- RRP – *Reynold Road Packer*
- SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solo
- TRB – *Transportation Research Board*
- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	16
1.1 Objetivo Geral	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	17
2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS	20
2.3 SOLOS EM OBRAS RODOVIÁRIAS E FERROVIÁRIAS	22
2.3.1 Classificação HRB/TBR e SUCS	29
2.3.2 Curva de Compactação	32
2.3.3 Índice de Suporte Califórnia (ISC)	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 MATERIAIS	38
3.1.1 Solo residual de gnaise	38
3.1.2 Con-Aid® CBR-Plus	41
3.2 MÉTODOS	44
3.2.1 Ensaio de limite de liquidez	45
3.2.2 Ensaio de limite de plasticidade	47
3.2.3 Ensaio de densidade real dos grãos	48
3.2.4 Granulometria	50
3.2.5 Ensaio de compactação	51
3.2.6 Ensaio de índice de suporte Califórnia (ISC)	54
3.2.6.1 <i>Ensaio de ISC para solo natural</i>	54
3.2.6.2 <i>Ensaio de ISC para solo aditivado e curado sem rega</i>	55
3.2.6.3 <i>Ensaio de ISC para solo aditivado e curado com rega</i>	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1 LIMITES DE ATTERBERG	57
4.2 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	58
4.3 GRANULOMETRIA	59
4.4 COMPACTAÇÃO	63
4.5 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA	64
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	69

5.1 CONCLUSÕES	69
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	70
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

O solo, constituído por um conjunto de partículas sólidas, água e ar, pode ser definido como a camada mais superficial da crosta terrestre originada da decomposição das rochas por agentes físicos e químicos (PINTO, 2006). Dos pontos de vista econômico, técnico e de segurança, é muito importante que se conheça as características e o comportamento do solo de base, para assim, assegurar que o mesmo possua capacidade de carga e rigidez necessárias para sustentação da obra.

Contudo, em alguns casos, os solos existentes no local da obra não oferecem as propriedades mínimas requeridas. Sendo assim, este deve ser substituído por outro solo mais adequado, ou tratado e melhorado utilizando diferentes métodos da engenharia geotécnica, até que se alcance as especificações mínimas exigidas para sua utilização.

De acordo com Moseley e Kirsch (2004), o tratamento visa um aumento na densidade e resistência ao cisalhamento, gerando redução da compressibilidade, o que influencia na permeabilidade e homogeneidade do solo, desta forma, resolvendo problemas de estabilidade.

As primeiras técnicas de estabilização do solo surgiram a partir do senso lógico de que:

[...] se os terrenos arenosos oferecem boas condições nas chuvas e excessiva poeira nas secas e se os terrenos argilosos, ao contrário, oferecem boas condições nas secas e lama nas chuvas, pode-se tentar conseguir uma estabilização misturando areias e argilas, em proporções tais que as argilas evitem o aparecimento de poeira nos terrenos arenosos, nas secas, e as areias evitem o aparecimento de lama nos terrenos argilosos, nas chuvas. (SENÇO, 2007, p.4).

Caputo (1988) e Senço (2007) definem estabilização de solo como qualquer técnica para melhorar as características de resistência, permeabilidade, compressibilidade e absorção de água, e desta forma, permitir ao solo tratado condições de resistir a deformações e rupturas provocados pela carga provinda da superestrutura.

Atualmente, existem diferentes técnicas de estabilização do solo que podem ser realizadas de forma natural ou artificial (SENÇO, 2007). Segundo Afrin (2017) e Sartori (2015), o solo pode ser estabilizado por métodos mecânicos, químicos ou físicos. Estabilização por métodos mecânicos refere-se à compactação do solo, normalmente utilizando diferentes tipos de rolos compactadores ou técnicas de vibração e impacto. Também considera-se método mecânico o tratamento realizado através da adição ou retirada de partículas do solo com a finalidade de alterar as propriedades granulométricas do mesmo.

Se a estabilização é obtida a partir da reação química da mistura de solo com algum aditivo, é caracterizado como método químico. Já a estabilização por métodos físicos é realizada através de tratamentos térmicos, elétricos ou utilizando geossintéticos. A escolha pelo método mais eficiente depende, principalmente, da composição do solo tratado.

Entre os estabilizadores químicos de solo presentes no mercado nacional está o Con-Aid®/CBR-Plus®, desenvolvido na década de 1970, na África do Sul, por Mr. J.J Grabe e colaboradores. Consiste de um produto líquido complexo, não corrosivo, atóxico e solúvel em água, implementado especificamente para a estabilização permanente de solos (SAVAGE, 2011).

O Con-Aid®/CBR-Plus® age principalmente nas partículas de argila, convertendo sua natureza hidrofílica (afinidade por moléculas de água) para uma natureza hidrofóbica (repele moléculas de água). Sendo assim, muda as propriedades de adsorção da água dos solos tratados. Isso proporciona um aumento da resistência natural ao cisalhamento, pela aglutinação de partículas após retirada da água ali adsorvida. Atualmente o produto é utilizado como estabilizante em aplicações de pavimentação de ruas, pistas de pouso e vias ferroviárias.

Para o projeto de uma via permanente, o solo de base, chamado de subleito, é estabilizado até que suas propriedades de resistência atinjam valores apropriados para sustentação da superestrutura, material rodante e todas as demais cargas provenientes do tráfego. Além disso, é importante que seja reduzido ao máximo a formação de poeira e lama, pois esses fatores podem enrijecer o lastro, diminuindo a vida útil da via (INDRARATNA; SHAHIN; RUJIKIATKAMJORN, 2016).

Teoricamente, os solos aditivados com Con-Aid®/CBR-Plus® apresentam diminuição de expansão e aumento do índice de suporte Califórnia (ISC), além de maior resistência ao cisalhamento e ao desgaste superficial depois de compactado. Com isso, considerando a utilização do produto como reforço do subleito de vias permanentes, nota-se que estes resultados são satisfatórios, podendo aumentar a vida útil e a capacidade de carga da via.

Sendo assim, este é um trabalho experimental que analisa, através de ensaios de laboratório, a variação das propriedades, físicas e mecânicas, de um solo pré-definido com a utilização do aditivo químico estabilizante Con-Aid®/CBR-Plus®. Com isso, considerando as novas características físicas e mecânicas do solo tratado, é discutida a viabilidade do produto em aplicações no subleito de vias permanente.

1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática da estabilização do subleito de vias férreas, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1 Objetivo Geral

Verificar experimentalmente a influência do aditivo químico Con-Aid®/CBR-Plus® no índice de suporte Califórnia de um solo residual de gnaisse.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar as propriedades físicas do solo natural e estabilizado;
- Avaliar, de forma comparativa, os efeitos da aplicação do aditivo às características físicas e mecânicas do solo natural e estabilizado;
- Apontar a viabilidade do produto em aplicações como reforço do subleito na infraestrutura de vias permanente considerando o solo estudado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica explica dados e conceitos relacionados a estabilização de solos, focando na estabilização do tipo química. Aborda também, as características, parâmetros e métodos de avaliação para solos utilizados comumente na pavimentação de rodovias e ferrovias.

2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Embora o solo seja um material complexo e variável, é muito utilizado nas obras de engenharia devido à sua abundância na natureza e baixo custo (NUNEZ, 1991). Para os casos onde o solo é utilizado como fundação para obras de construção civil, Makusa (2012) destaca que, entre os critérios de projeto geotécnico, a capacidade adequada de suporte do subsolo é fundamental.

Entretanto, é normal que o solo natural não satisfaça totalmente os requisitos de suporte requeridos para o projeto, sendo assim, o engenheiro deve seguir uma das seguintes opções: (AZEVEDO, 2010; MAKUSA, 2012; NUNEZ, 1991).

- Trocar o local da obra;
- Aceitar as limitações do solo e alterar o projeto para estas condições;
- Substituir o solo local por outro de melhor qualidade;
- Tratar o solo local visando alterar suas propriedades, de modo que, este consiga atender as exigências do projeto.

Aceitar as limitações do solo natural impacta na diminuição da qualidade da obra. Já trocar o local escolhido ou substituir o solo natural por outro mais adequado podem aumentar consideravelmente os custos envolvidos. Sendo assim, a melhor opção, considerando fatores econômicos e de qualidade, pode ser tratar o solo natural para que o mesmo alcance as especificações mínimas exigidas para o projeto (AZEVEDO, 2010; BRITO; PARANHOS, 2017).

O tratamento do solo visando alterar suas propriedades geotécnicas, possibilitando assim, sua aplicação como material de engenharia é denominada estabilização de solos (ZUBER et al., 2013). Este é um método de tratamento milenar, utilizado principalmente na

pavimentação para melhorar a resistência e durabilidade do solo ou evitar erosão e formação de poeira (BRITO; PARANHOS, 2017; ROSA; FERREIRA; GUIMARÃES, 2015).

Segundo Caputo (1988), Pinto (2006) e Zuber e et al. (2013), a finalidade da estabilização visa aumentar a capacidade de carga do solo, por conta da melhoria da resistência ao cisalhamento, bem como reduzir a compressibilidade, melhorar a capacidade de drenagem e resistência do solo às intempéries. Este efeito é alcançado através da redução dos espaços entre as partículas (definição de compactação), alteração granulométrica, impermeabilização de partículas ou pela combinação destas (MAKUSA, 2012; VARGAS, 1977 apud TISCOSKI; ARNS, 2016).

Carvalho (2011) afirma que os principais motivos para o emprego da estabilização em um determinado solo é a necessidade de melhorar sua “[...] durabilidade sob ação da água e aumentar sua resistência às ações mecânicas.” (CARVALHO, 2011, p.11). Para isso, existem vários métodos que podem ser classificados entre diferentes tipos (AFRIN, 2017). De acordo com Carvalho (2011), Nunez (1991), Tiscoski e Arns (2016) podemos classificar a estabilização, como já mencionado, em:

- Mecânica;
- Física;
- Química.

A estabilização mecânica está relacionada com a alteração das propriedades geotécnicas do solo através da aplicação de energia mecânica, sem a mistura de aditivos (como o cimento, a cal, o betume e outros) (AFRIN, 2017; NUNEZ, 1991). Brito e Paranhos (2017, p.3) definem estabilização mecânica como “[...] uma melhoria proveniente das mudanças no sistema trifásico, ou seja, alterações na proporção das partes sólidas, líquidas e gasosas.”. Este efeito é alcançado através da drenagem, compactação e/ou pela mistura de diferentes tipos de solos (NUNEZ, 1991).

A mistura entre dois ou mais tipos de solos, ou retirada de partículas deste, é chamada de correção granulométrica, e a estabilização por este método é também conhecida como estabilização granulométrica (MEDINA et al., 2005 e LIMA et al., 1993 apud BRITO; PARANHOS, 2017; SENÇO, 2007). Normalmente todas as técnicas mecânicas são combinadas com a compactação (NUNEZ, 1991; SANTOS, 2012).

Portanto, estabilização mecânica consiste na redução, ou preenchimento, dos vazios existentes no solo, tornando-o menos suscetível aos efeitos da água e aumentando sua resistência mecânica (BRITO; PARANHOS, 2017). É um método simples e barato quando comparado aos

demais, por isso, estabilizações por meios físicos e químicos geralmente só são utilizadas quando a estabilização mecânica, por si só, é insuficiente (NUNEZ, 1991).

Na estabilização por métodos físicos, as novas propriedades dos solos são obtidas através de técnicas que utilizam tratamento térmico, elétrico ou através da aplicação de reforços com materiais não biodegradáveis fibrosos (CARVALHO, 2011; PINTO, 2006; ZUBER et al. 2013). Sendo assim, estão incluídas neste tipo todas as estabilizações que mudam a textura do solo através de reações físicas, como mudança de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção, assim como, métodos utilizando materiais alternativos para reforço do solo, como uso de tecidos geotêxtis (NUNEZ, 1991; SANTOS, 2012; ZUBER et al. 2013).

Já a estabilização do tipo química engloba todas as técnicas que utilizam de reações químicas entre aditivos estabilizadores e minerais presentes no solo, para assim, alcançar as propriedades geotécnicas necessárias (BRITO; PARANHOS, 2017; MAKUSA, 2012; NUNEZ, 1991). Como o aditivo estudado neste trabalho possui características de estabilizante químico, este tipo de tratamento será discutido de forma mais aprofundada no próximo tópico.

A escolha pelo melhor método de estabilização vai depender de uma série de fatores como: viabilidade técnica e econômica, finalidade da obra, exigências de projeto, tempo disponível, características do solo natural e quais são suas propriedades que devem ser corrigidas (AZEVEDO, 2010; KAMMER; ARNS, 2013; BRITO; PARANHOS, 2017).

De acordo com Azevêdo (2010), o critério mais utilizado para a decisão pelo melhor método é relacionado aos custos de execução e manutenção. Para garantir a efetividade do método escolhido, é aconselhado realizar ensaios laboratoriais e testes de campo, para assim verificar as novas propriedades do solo estabilizado e definir qual a melhor dosagem do agente estabilizador a ser utilizado (BRITO; PARANHOS, 2017).

Segundo Makusa (2012) e Sherwood (1993), citados por Brito, Paranhos (2017), as principais propriedades do solo que devem ser consideradas e compreendidas pelo engenheiro encarregado pela obra são “Estabilidade, força, compressibilidade, permeabilidade e durabilidade do volume [...]” (BRITO; PARANHOS, 2017, p.4).

É importante lembrar que normalmente a estabilização final é alcançada através da união de diferentes métodos, e não apenas um. Embora atualmente exista uma grande variedade de métodos de estabilização, novas técnicas vêm sendo aprimoradas ao longo do tempo (BRITO; PARANHOS, 2017).

2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS

Um dos grandes problemas em obras da engenharia civil é lidar com subleitos de solos predominantemente argilosos (AFRIN, 2017; NUNEZ, 1991). Isso porque solos argilosos são constituídos de grãos finos que, em conjunto, formam um solo mole de partículas hidrofílicas, tendendo assim, a inchar com aumento do teor de umidade (CAPUTO, 1988; ZUBER et al., 2013).

Segundo Caputo (1988), as características dos solos argilosos são extremamente dependentes da umidade, de modo que, maiores níveis de água absorvida resultam em perda de resistência ao cisalhamento e alta compressibilidade, tornando assim, o solo inviável para utilização em obras, como por exemplo, na pavimentação de rodovias ou ferrovias (CAPUTO, 1988; KAMMER; ARNS, 2013). A partir da necessidade de estabilizar esse tipo de solo, principalmente para fins urbanos e militares, surgiram os métodos de estabilização química (AFRIN, 2017; KAMMER; ARNS, 2013).

Estabilização química do solo é caracterizada como qualquer método de tratamento que melhore permanentemente a capacidade de suporte e estabilidade volumétrica contra expansão excessiva, e ao mesmo tempo, diminua a permeabilidade e compressibilidade do solo nativo (BRITO; PARANHOS, 2017; FERNANDES 2005).

Segundo Nunez (1991, p.4), “As reações químicas que proporcionam a estabilização do solo são a troca de íons, a polimerização e a oxidação.” A troca de íons, ou troca de base, consiste do fenômeno de alternância dos íons catiônicos absorvidos na superfície das partículas presentes no solo (CAPUTO, 1988).

Portanto, a adição de estabilizadores químicos provoca reações químicas que ajudam o solo natural alcançar um grau de umidade adequado para melhorar a compactação, reduzindo consideravelmente a capilaridade e o número de micro poros existentes. Com isso, o novo solo deve apresentar melhores propriedades físicas e mecânicas, o que pode-lhe tornar viável para utilização em diferentes obras da construção civil (MAKUSA, 2013; MEDINA, 1987 apud BRITO; PARANHOS, 2017; FERNANDES, 2005).

Segundo Graves e colaboradores (1988) citado por Zuber e colaboradores (2013), os estabilizadores químicos atuam como auxiliares de compactação, ligantes, repelentes de água e modificadores de comportamento do solo. Por isso, métodos de estabilização química normalmente são seguidos de métodos mecânicos, como compactação por rolo compressor.

A estabilização química não é um conceito novo. Métodos de tratamento utilizando a cal, cimento e outros aditivos já são utilizados há muito tempo (BRAZETTI, 2001; ROSA;

FERREIRA; GUIMARÃES, 2015). De acordo com Guimarães (2002) citado por Rosa e colaboradores (2015, p.398):

A adição de cal é uma das mais antigas técnicas utilizadas pelo homem para obter a estabilização ou a melhoria de solos instáveis. Há exemplos dessa utilização na via Àpia (sul da Itália) construída em 312 a.C. e num dos trechos da Muralha da China datado de 2280 a.C.

A cal, ou carbonato de cálcio, começou a ser utilizada em longa escala em meados a Segunda Guerra Mundial e é amplamente utilizada até hoje, principalmente para tratamento do subleito de obras de pavimentação (AFRIN, 2017; BRAZETTI, 2001; MOAYED; ALLAHYARI, 2012; ROSA et al., 2015). Lima e colaboradores (1993), citado por Rosa e colaboradores (2015, p.398), afirmam que “[...] Grande parte do avanço tecnológico deve-se ao *Texas Highway Department*, que, a partir de 1945, desenvolveu muitos trabalhos de laboratório e de campo na área.”.

Quando adicionada a um solo argiloso, a cal, estabiliza o terreno através de reações de troca de cátions, com isso, as partículas de argila são envolvidas por uma camada dupla hidratada difusa, modificada pela troca iônica de cálcio (MOAYED; ALLAHYARI, 2012). O efeito disto é a floculação, que basicamente consiste da aproximação das partículas de argila devido a alteração da densidade de carga elétrica destas. Sendo assim, o resultado é um solo com maior durabilidade, resistência e qualidade, propriedades essas que não poderiam ser alcançadas através da utilização da maioria dos métodos mecânicos e físicos conhecidos (MOAYED; ALLAHYARI, 2012, ZUBER et al., 2013).

Outro método químico muito utilizado no decorrer dos séculos é o tratamento com cimento. Este foi utilizado pela primeira vez, para fins de estabilização do subleito de rodovias, no início do século XX (AFRIN, 2017; MOAYED; ALLAHYARI, 2012). De acordo com Cook e Spence (1983) citado por Santos (2012), a mistura de água mais cimento consegue dispersar-se através dos vazios no solo (poros), preenchendo-os, e endurece quando seco formando uma camada resistente.

Com isso, outros métodos surgiram, como utilizando cinzas volantes, polímeros orgânicos, materiais betuminosos, resinas de diferentes tipos, pozolanas, compostos de fósforo, silicatos de sódio, produtos industrializados ou até mesmo resíduos industriais (AZEVEDO, 2010; BRITO; PARANHOS, 2017; MAKUSA, 2012; MOAYED; ALLAHYARI, 2012; SANTOS, 2012).

Um grande impulso para o desenvolvimento de novos aditivos químicos para fins de estabilização de solos ocorreu em 1952, durante a primeira conferência realizada voltada a este

assunto (BRAZETTI, 2001). Após o evento, concluiu-se que novas sugestões de aditivos utilizando materiais poliméricos seriam promissoras e/ou que novos métodos poderiam surgir a partir do “[...] trabalho conjunto entre especialistas em química e em solos e, pela iniciativa privada,” (BRAZETTI, 2001, p.4), o que acabou acontecendo nos próximos anos.

Atualmente, existem muitos aditivos patenteados para estabilização de solos, alguns voltados apenas para controle da poeira e lama, outros para servir como agentes de impermeabilização e cimentação, facilitando assim, a compactação do solo (AFRIN, 2017; BRAZETTI, 2001). Segundo Brazetti (2001), podemos dividi-los em cinco classes:

- Polímeros;
- Óleos;
- Enzimas;
- Ligninas;
- Surfatantes.

A classe de polímeros abrange todos os compósitos a base de polímeros sintéticos e emulsificados em água, aminas, copolímeros acrílo-vinílicos, poliacrilatos hidrofílicos, diversos tipos de resinas e mais. Já a classe dos óleos abrange compostos desenvolvidos a base de diferentes tipos de óleos e emulsões. O produto estudado neste trabalho faz parte desta classe (BRAZETTI, 2001).

Na classe de enzimas participam os produtos enzimáticos agrupados. Os compostos da classe das ligninas envolvem compostos de lignosulfonatos de amônia e lignosulfonatos de cálcio. E enfim, a classe do surfatantes abarca polímeros surfantes, cloretos de cálcio e substâncias de superfície ativa (BRAZETTI, 2001).

Com o avanço da indústria petroquímica e da tecnologia de processamento de matérias primas, junto da busca atual por métodos sustentáveis, resultam em um mercado consideravelmente vasto em opções para estabilização química de um solo (BRAZETTI, 2001). A escolha pelo melhor método depende principalmente da reação química entre o aditivo e os minerais presentes no solo, da classificação do solo a ser estabilizado, e das melhorias desejadas (BRITO; PARANHOS, 2017; KIRAN; MOHAN, 2016).

2.3 SOLOS EM OBRAS RODOVIÁRIAS E FERROVIÁRIAS

Como já mencionado, do ponto de vista geológico o solo é o resultado da decomposição das rochas por ações de intemperismo, químico ou físico (CAPUTO, 1988;

PINTO, 2006). Quando se refere à pavimentação, para meios rodoviários ou ferroviários, o solo é considerado qualquer tipo de material orgânico ou inorgânico, solto ou parcialmente cimentado, presente na superfície da terra (DNIT, 2006; SENÇO, 2007).

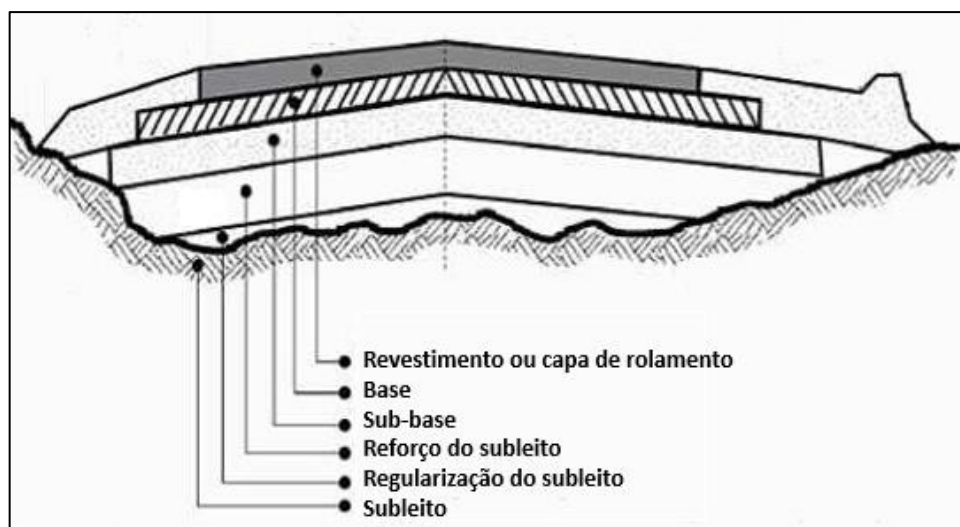
Pavimento é o nome dado a superestrutura, formada por finas camadas de diferentes materiais, com diferentes resistências e deformabilidades, que tem como principal objetivo resistir, reduzir e distribuir para a infraestrutura, ou subleito, os esforços horizontais e verticais provenientes do tráfego (DNIT, 2006; MAGALHÃES, 2001; PIMENTEL, 2007; TEIXEIRA, 2014).

É importante que não “[...] ocorra ruptura ou deformação excessiva no subleito.” (PIMENTEL, 2007, p.10). Portanto, a estrutura do pavimento deve ser projetada de modo que apresente espessura e propriedades mecânicas adequadas para este fim. Um pavimento de melhor qualidade permite condições de transporte mais cômodas e seguras durante um longo período de tempo (MAGALHÃES, 2001; GIROUD et al., 1984 apud PIMENTEL, 2007).

Senço (2007, p.15) diz que uma seção transversal comum de pavimento deve ser constituída de uma fundação (ou subleito) e de “[...] camadas com espessuras e materiais determinados por um dos inúmeros métodos de dimensionamento.” A Figura 1 mostra a seção transversal de um pavimento rodoviário típico. As camadas que formam este pavimento são: (DNIT, 2006, 2001; SENÇO, 2007).

- Revestimento ou capa de rolamento;
- Base;
- Sub-base;
- Reforço do subleito;
- Regularização;
- Subleito.

Figura 1- Seção típica de um pavimento rodoviário.



Fonte: Senço (2007, p. 16), adaptada pelo autor (2018)

De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT (2006) e Senço (2007), o revestimento é a camada mais superficial de um pavimento, onde está presente a pista de rolamento, e tem como principal função receber diretamente os esforços do tráfego. Pode ser rígido (por exemplo, estabilizado com cimento) ou flexível (como os estabilizados com materiais asfálticos ou betuminosos) e devem ser o mais impermeável possível.

Abaixo do revestimento estão as camadas chamadas de base e sub-base, que por sua vez, têm a função de “[...] receber e reduzir as tensões provocadas pelas cargas repetidas do tráfego e transmiti-las ao subleito de maneira a minimizar a ocorrência de ATR” (DNIT, 2007, p.11). ATR é a sigla utilizada para o efeito de Afundamento de Trilha de Rodas, que consiste da deformação longitudinal no pavimento, devido às tensões provocadas por cargas repetidas, provenientes do tráfego (DNIT, 2007; MAGALHÃES, 2001).

A camada de base, assim como o revestimento, pode ser rígida ou flexível (MAGALHÃES, 2001). Já a camada de sub-base, possui as mesmas funções da base, porém, sendo constituída de um material de menor qualidade. Camadas de sub-base são utilizadas por motivos técnicos, como o de reduzir a espessura da base, ou econômicos, ligados a reduzir custos (MAGALHÃES, 2001; SENÇO, 2007).

A camada de espessura constante subsequente é chamada de reforço do subleito, que basicamente tem por função diminuir a espessura da camada de sub-base, sendo constituída por um material de características geotécnicas menos nobres (DNIT, 2006; FERNANDES, 2005). Senço (2007) afirma que, embora muitas vezes essa camada seja associada à fundação, essa

associação é meramente formal, visto que o reforço do subleito “[...] é parte constituinte especificamente do pavimento e tem funções de complemento da sub-base [...]” (SENÇO, 2007, p.19).

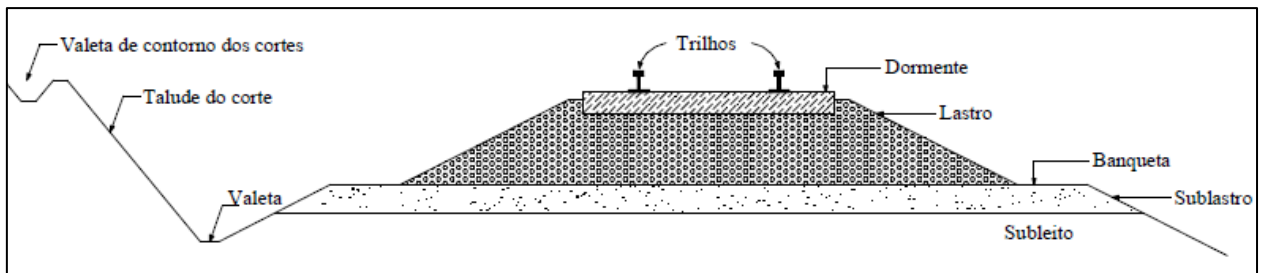
A camada de regularização está presente sobre a superfície do solo que foi obtida pela terraplanagem. De acordo com Senço (2007), a camada de regularização tem espessura irregular e tem como função distribuir as tensões, transversais e longitudinais, de forma uniforme sobre o subleito.

O subleito não é uma camada, e sim, “[...] o terreno de fundação do pavimento” (SENÇO, 2007, p.15). Sendo assim, o subleito é basicamente constituído pelo solo local, logo, é papel do engenheiro compreender que a qualidade do pavimento é diretamente dependente da qualidade deste solo. Por isso, o terreno “[...] deve ser bem estudado, no mínimo, até as camadas de 0,60 a 1,50 m de profundidade” (SOUZA, 1980 apud MAGALHÃES, 2001, p.6), para assim, garantir que está apto a receber e suportar as camadas da superestrutura do pavimento, assim como, os esforços resultantes do tráfego (MAGALHÃES, 2001; SENÇO, 2007; TEIXEIRA, 2014).

Para obras ferroviárias, a seção transversal do pavimento é similar aos rodoviários, porém, as partes da superestrutura (camadas) apresentam comprimento e espessura distintas. Normalmente é constituída apenas por 3 camadas, sendo elas, lastro, sublastro e subleito, como mostrado na Figura 2 (BRINA, 1988; FERNANDES, 2005).

O lastro é a camada de seção transversal trapezoidal que recebe diretamente os dormentes, trilhos e componentes de fixação (BRINA, 1988; COIMBRA, 2008). É constituída por material granular (normalmente cascalho, escória de alto forno/aciaria ou material britado) e, de acordo com Brina (1979), Stopatto (1987) e Castello Branco e colaboradores (2002), citados por Coimbra (2008), tem a função de distribuir todos os esforços e tensões resultantes do material rodante de forma uniforme. Além disso, também auxilia a drenagem da água provinda da chuva. Sendo assim, a espessura e qualidade desta camada estão diretamente relacionadas com a elasticidade de toda a via permanente.

Figura 2 - Seção transversal de um pavimento ferroviário.



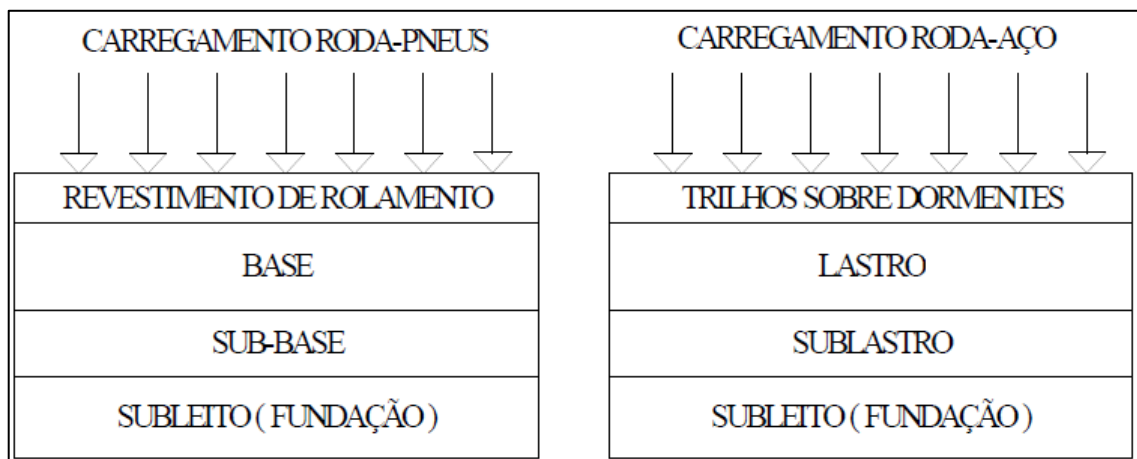
Fonte: Pimentel (2007, p.33)

Além de fornecer amortecimento para o sistema, outra função muito importante do lastro é manter a geometria da via, ou seja, manter os dormentes fixados no lugar (PIMENTEL, 2007).

A camada abaixo do lastro é chamada de sublastro. Esta é considerada uma camada complementar do lastro. O sublastro é formado, também, por material granular, porém, de menor qualidade do que o empregado no lastro. Sua principal função é “Aumentar a capacidade de suporte do subleito, funcionando como uma camada de transição para melhor distribuição do carregamento” (PIMENTEL 2007, apud BRINA, 1979, p.35), além de reduzir a camada de lastro, gerando benefícios técnicos e econômicos.

A camada seguinte é o subleito que, como já explicado, é definida como infraestrutura do pavimento (BRINA 1988; FERNANDES, 2005; PIMENTEL 2007). Sendo assim, de acordo com Fernandes (2005), podemos assemelhar os pavimentos rodoviários e ferroviários como mostrado na Figura 3. Desta forma, a maior diferença entre os dois tipos de pavimento é referente a pressão de carregamento, muito maior no sistema ferroviário

Figura 3 - Sistema de camadas em pavimentos rodoviários e ferroviários.



Fonte: Fernandes (2005, p.36)

As propriedades físicas e mecânicas mais desejadas para um solo utilizado como subleito para obras rodoviárias e ferroviárias são: alta resistência ao cisalhamento e baixa permeabilidade e expansibilidade (DNIT, 2006).

De acordo com a pesquisa realizada por Li e Selig (1995), a umidade é o principal fator que determina a qualidade de um subleito, sendo que, quanto mais suscetível à mudança de umidade, pior será sua qualidade como fundação do pavimento. Subleitos formados por grãos muito finos possuem a tendência de diminuir sua resistência à medida que absorvem mais água. Já os formados por granulação grossa conseguem drenar melhor a água presente e, por isso, são menos suscetíveis à mudanças de umidade (CAPUTO, 1988; LI; SELIG, 1995).

A espessura da superestrutura do pavimento dependerá da resistência do subleito, de modo que, quanto menor esta resistência, maior deverá ser a espessura das próximas camadas do pavimento. Caso o solo do subleito escolhido não apresente as condições mínimas exigidas, este deve ser estabilizado ou substituído por um solo mais apropriado (SENÇO, 2007; TEIXEIRA, 2014).

Para avaliar as propriedades do subleito e garantir que este esteja apto para o projeto, alguns critérios de avaliação são utilizados (SENÇO, 2007; TEIXEIRA, 2014). Os mais conhecidos e amplamente empregados são através dos seguintes ensaios do solo em laboratório:

- Caracterização física e classificação segundo HRB/TRB, SUCS;
- Curva de Compactação;
- Índice de Suporte Califórnia (ISC);

Nos próximos tópicos serão apresentados dados sobre estes parâmetros, assim como, resultados obtidos, por outros autores, utilizando solos residuais de gnaiss, tipo de solo comum da região sul do Brasil e utilizado para os experimentos deste trabalho.

De modo geral, de acordo com as normas DNIT 108 (2009) e DNIT 138 (2010), o solo é considerado adequado para aplicações como fundação em pavimentos rodoviários, se possuir as seguintes características:

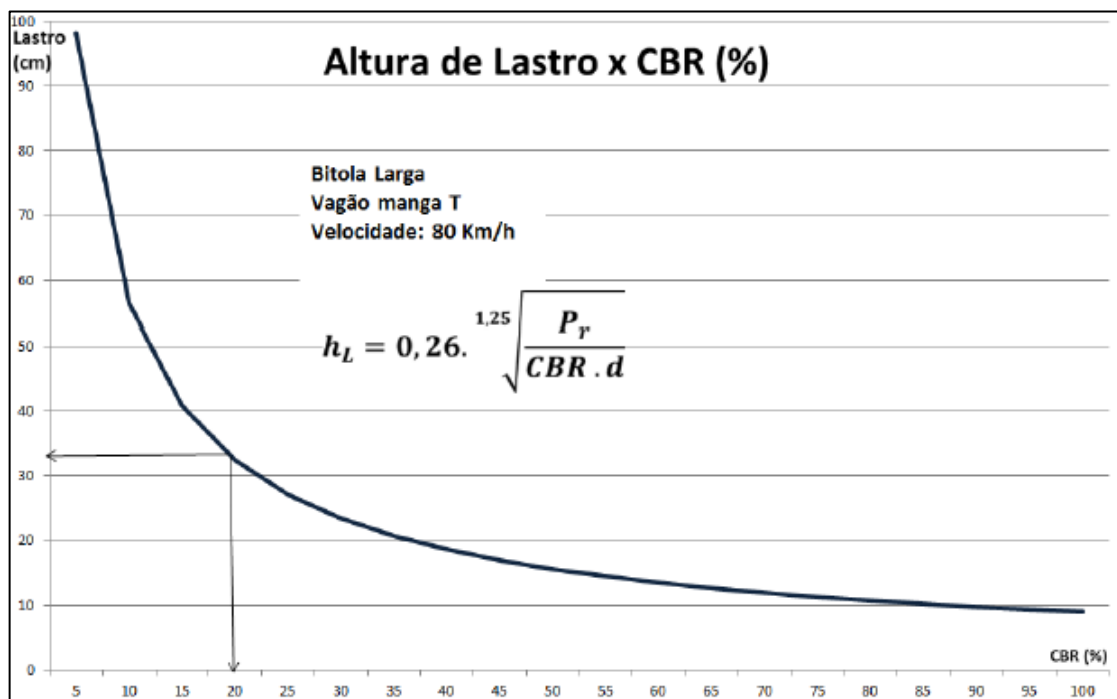
- Quando utilizado como subleito deve apresentar uma expansão, medida no ensaio de ISC, menor ou igual a 2 % e um ISC maior ou igual a 4 %.
- Quando utilizado como reforço do subleito deve apresentar ISC maior que o do subleito e expansão menor ou igual a 1 %.

Já para pavimentos ferroviários, os seguintes parâmetros são desejados para o subleito (DNIT, 2015; RUMO, 2016):

- Valor de ISC igual ou superior a 20 %;
- Limite de liquidez igual ou menor a 40 %;
- Índice de plasticidade inferior ou igual a 15 %;
- Expansão máxima de 1 %.

A altura do lastro (h_L) é calculada em função do ISC do subleito, sendo que seu limite máximo da altura é de 37 cm. Um lastro com altura superior a 37 cm é considerável instável (RUMO, 2016). A altura do lastro em função do ISC (CBR) é mostrada no Gráfico 1, onde, “Pr” é a carga máxima por roda e “d” é a distância entre eixos.

Gráfico 1 - Relação entre altura de lastro e índice de suporte Califórnia.



Fonte: RUMO (2016, p.43)

Observando o gráfico é possível notar que, para valores de ISC inferiores a 20 %, a altura do lastro ultrapassa o limite máximo de altura. Sendo assim, é recomendada a utilização de sublastro ou tratamento do solo do subleito.

2.3.1 Classificação HRB/TBR e SUCS

Para ser utilizado como fundação, o solo deve ser classificado de modo “[...] que se possam formular métodos de projetos baseados em algumas propriedades de cada grupo.” (DNIT, 2006, p.55). Sendo assim, diferentes métodos de classificação são utilizados para avaliar a qualidade do solo para diferentes aplicações, em obras de engenharia (DNIT, 2006).

O sistema de classificação mais utilizado para fins de pavimentação é o *Highway Research Board* (HRB), ou, como chamado atualmente, *Transportation Research Board* (TRB), originário do sistema de classificação antigo *Public Roads Administration* (CAPUTO, 1988; PIMENTEL, 2007). Nesta classificação são considerados os valores de granulometria, limite de liquidez, índice de plasticidade e índice de grupo, para assim, classificar o solo em excelente, bom, regular ou ruim, para aplicações como subleito de pavimentos (DNIT, 2006; CAPUTO, 1988; PIMENTEL, 2007).

A tabela HRB divide o solo em grupos e subgrupos a partir da granulometria e plasticidade, como já mencionado. Os solos granulares, definidos como os solos onde a porcentagem passante pela peneira granulométrica número 200 é inferior a 35 %, compreendem os grupos A-1, A-2 e A-3. Já os solos finos, onde a porcentagem passante dos grãos pela peneira número 200 é superior a 35 %, constituem os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. Os grupos A-1, A-2 e A-7, ainda são divididos em subgrupos. O Quadro 1 a seguir, mostra a tabela de classificação HRB (DNIT, 2006; CAPUTO, 1988).

Quadro 1 - Quadro de Classificação Highway Research Board.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200						MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS				
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom						Sofrível a mau				

Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006, p.56)

De acordo com Godoi (2014), Machado (2012) e Magalhães (2001), para um solo residual de gnaiss, similar ao utilizado durante o presente trabalho, a classificação HRB/TRB recai normalmente nos grupos A-7-5, A-7-6 e A-6. Esses são classificados como regulares a ruins, em aplicações de subleito, pois normalmente apresentam maior quantidade de finos, o que não é indicado como material de camada de pavimento, e por isso, necessitam de estudos especiais (MAGALHÃES, 2001).

O Quadro 2, mostrado a seguir, indica os valores de granulometria e limites de Atterberg encontrados por Godoi (2014) em seus ensaios envolvendo solos residuais de gnaiss da região catarinense. Porém, é importante salientar que as curvas granulométricas, para solos deste tipo, tendem a variar dependendo do processo de intemperismo imposto pelo ambiente. Já os limites de Atterberg geralmente permanecem fixos num mesmo limite de valores (SILVEIRA, 1991 apud SILVEIRA, 2005).

Quadro 2- Valores de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade obtidos para um solo residual gnaisse.

Solo Residual de gnaisse da região de Santa Catarina	
Fração de Pedregulho [%]	2,58
Fração de Areia [%]	37,08
Fração de Silte [%]	54,45
Fração de Argila [%]	5,89
Limite de Liquidez [%]	52
Limite de Plasticidade [%]	34

Fonte: Godoi (2014, p.84), adaptada pelo autor (2018)

Outro sistema de classificação de solos muito conhecido e utilizado é o Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS). De acordo com (DNIT, 2006), este sistema foi introduzido a partir do trabalho publicado em 1953 pela *Waterways Experiment Station*, e realizado por duas agências federais americanas em conjunto, a *Bureau of Reclamation* e a *Corps of Engineers*. Este teve como objetivo aperfeiçoar o sistema para aeroportos elaborado pelo professor Arthur Casagrande, da Universidade de Harvard, em 1943.

Nesse sistema, também são consideradas as características granulométricas, de textura e de plasticidade do solo, para assim, dividi-los em grupos de acordo com seu comportamento quando usados em ruas, pistas, aterros e fundações (DNIT, 2006; TEIXEIRA, 2014).

As principais divisões do quadro de classificação SUCS são de solos de graduação grossa (quando mais de 50 % do peso total fica retido na peneira nº 200), solos de graduação fina (onde 50 % ou mais do peso total passa pela peneira nº 200) e solos altamente orgânicos (DNIT, 2006).

O Quadro 3, a seguir, mostra a tabela de classificação SUCS.

Quadro 3 - Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS).

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped.areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS com $LL \leq 50$		ML	Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.
			CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.
			OL	Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.
	SILTES e ARGILAS com $LL > 50$		MH	Siltes - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes elásticos.
			CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.
			OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.
	Solos Altamente Orgânicos			PT

Fonte: Manual de Pavimentação DNIT (2006, p.59)

De acordo com os ensaios realizados por Godoi (2014) e Magalhães (2001) solos residuais de gnaiss, sua classificação comum utilizando o sistema SUCS é ML, que consiste de siltes inorgânicos, areias muito finas e/ou areias finas siltosas e argilosas.

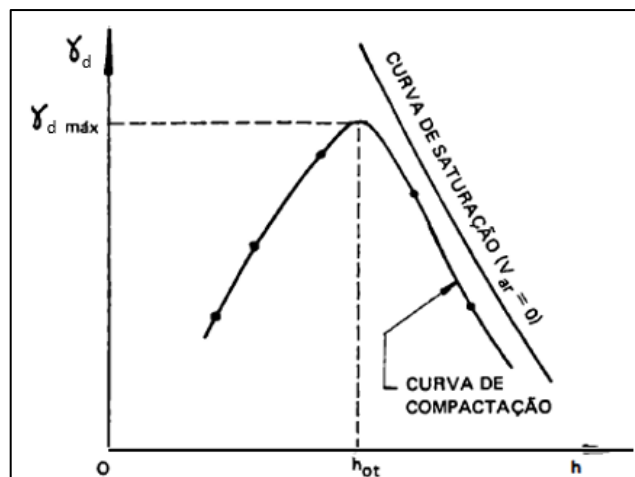
Por outro lado, alguns autores afirmam que as tabelas de classificação SUCS e HRB não são precisas em estimar as propriedades dos solos residuais (COZZOLINO E NOGAMI, 1993 apud MACHADO, 2012). De acordo com Souza Neto e Coutinho (2001), citados por Machado (2012), nenhuma terminologia atualmente aceita é capaz de descrever as várias diferentes classes de solos residuais.

2.3.2 Curva de Compactação

De acordo com Caputo (1988), “Entende-se por compactação de um solo, o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de seus vazios e, assim, aumentar sua resistência, tornando-o mais estável,” (CAPUTO, 1988, p.172). Logo, a compactação, que normalmente é realizada com rolos compactadores, visa melhorar as características de resistência, permeabilidade, compressibilidade e de absorção d’água de um determinado solo, através da expulsão do ar por energia mecânica. A qualidade da compactação está diretamente ligada com a energia e compactação e teor de umidade do solo (CAPUTO, 1988; PINTO, 2006).

Uma ferramenta muito útil para análise de compactação de um solo é a curva de compactação. Esta curva é obtida através da variação dos pesos específicos em função da umidade para uma energia de compactação constante. Através da curva obtida, é possível observar que, em um determinado ponto, o peso específico (γ_d) do solo será máximo. A umidade (h) correspondente a este ponto é chamada de umidade ótima (h_o). Sendo assim, este ponto é referente a melhor compactação possível para o solo em questão, como mostrado na Figura 4. Curvas de compactação podem ser obtidas através de ensaios Proctor, que possui três energias de compactação padronizadas como mostrado na Quadro 4 (CAPUTO, 1988; PINTO, 2006).

Figura 4 - Esquema de uma curva de compactação.



Fonte: Caputo (1988, p.173)

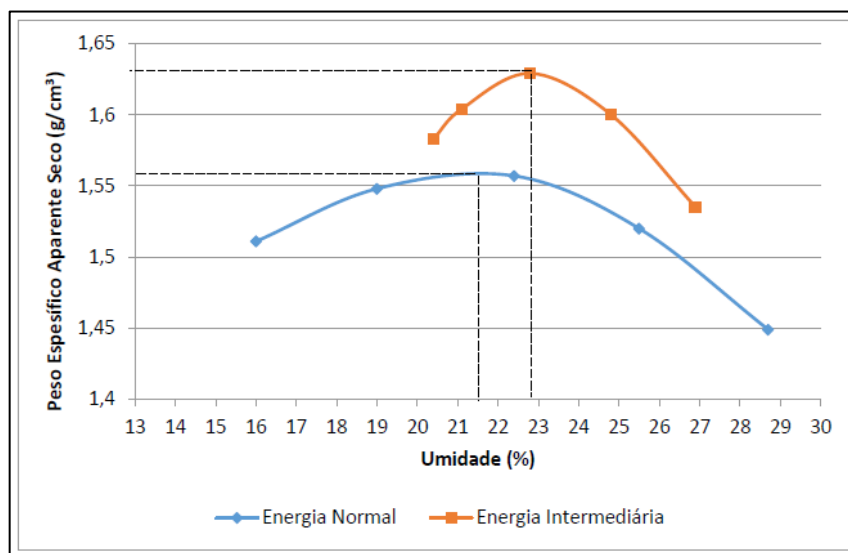
Quadro 4 - Energias de Compactação Proctor.

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador [mm]	63,5	63,5	63,5

Fonte: ABNT NBR 7182 (2016, p.5), adaptado pelo autor (2018)

Fernandes (2015) obteve os seguintes resultados para um solo residual de gnaiss, da região de Joinville-SC, em ensaios de compactação com energia Proctor normal e intermediária, mostrados no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Curva de compactação típica para um solo residual de Gnaisse para energia de compactação normal e intermediária.



Fonte: Fernandes (2015, p.51)

Observando o Gráfico 2, verifica-se que o peso específico máximo de uma amostra de solo residual gnaisse, estudada por Fernandes (2015), é de aproximadamente $1,56 \text{ g/cm}^3$, para energia de compactação normal, e $1,64 \text{ g/cm}^3$ para energia intermediária. Já a umidade ótima, para máxima compactação deste solo, é de aproximadamente de 21,5 % para energia normal e 23 % para energia intermediária.

Magalhães (2001) obteve em seus ensaios valores de umidade ótima entre 15 e 17%, para diferentes amostras de solo residual gnaisse do estado de Santa Catarina. Esses valores foram obtidos através de curvas de compactação originadas de ensaios Proctor com energia de compactação normal.

A execução dos ensaios de compactação, como os mostrados anteriormente, é normalizada pela norma ABNT NBR 7182 (2016).

2.3.3 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) é um dos critérios mais utilizados “[...] para avaliar o comportamento de um solo, quer como fundação de pavimento, quer como componente das camadas desse pavimento” (SENÇO, 2007, p.219).

Este parâmetro é amplamente utilizado para definir a resistência e a capacidade de suporte de um determinado solo utilizado para fins de pavimentação (CAPUTO, 1988; SENÇO, 2007).

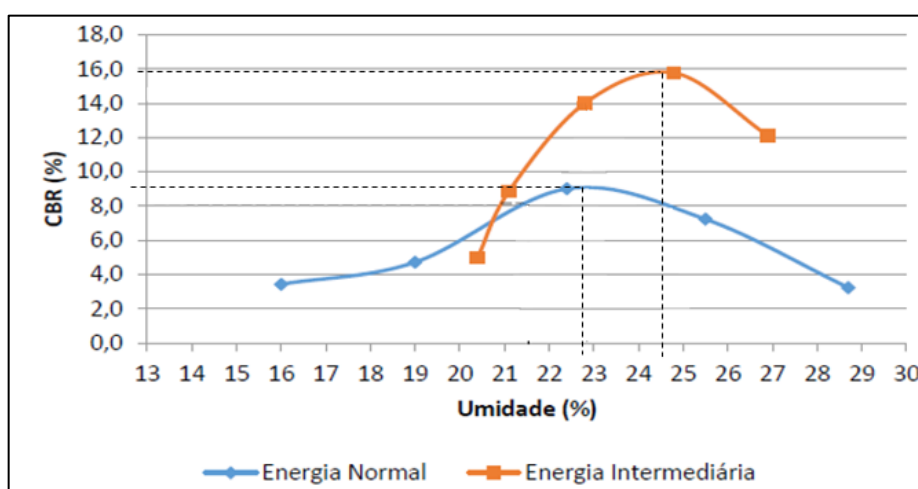
O ensaio de ISC foi introduzido por O. J. Porter, em 1929 e, é utilizado até os dias de hoje. Atualmente a execução desses ensaios são normalizados pela norma da ABNT NBR 9895, sendo a mais recente revisada em 2017 (CAPUTO, 1988; SENÇO, 2007; VENTURINI, 2015).

De acordo com o manual de pavimentação DNIT (2006), o ensaio consiste em determinar a relação entre a pressão necessária para um pistão penetrar numa amostra compactada de solo estudado, e a pressão imposta para uma mesma penetração do pistão em uma brita padronizada.

Basicamente o procedimento para obter o valor de ISC embasa-se na combinação de ensaios de expansão e compactação que, através dos resultados obtidos, são comparados aos valores de um solo padrão da Califórnia, dito como ótimo (ISC igual a 100 %). O valor de ISC para um determinado solo será dado através da relação, em termos de porcentagem, da pressão calculada, através de ensaios, e da pressão padrão proposta por Porter (CAPUTO, 1988; SENÇO, 2007).

Fernandes (2015) obteve os seguintes resultados para solos residuais gnaiss, como mostrado no Gráfico 3 abaixo. Nota-se que os valores máximos de ISC obtidos são: aproximadamente 9 % quando utilizada energia normal, e 16 % quando utilizada energia intermediária.

Gráfico 3 - Valores obtidos de ISC para amostras de solos residuais gnaiss da região de Joinville, com energias de compactação normal e intermediária.



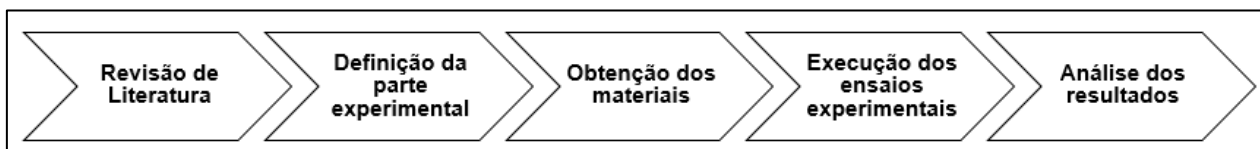
Fonte: Fernandes (2015, p.60), adaptado pelo autor (2018)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados os materiais e procedimentos utilizados na execução do presente trabalho. Sendo que, basicamente, o estudo envolve a utilização de apenas dois materiais. Uma amostra de solo residual de gnaiss da região de Joinville – SC, e o aditivo químico Con-Aid® CBR-Plus. Ambos serão caracterizados nos próximos tópicos.

A Figura 5 mostra o fluxograma da metodologia utilizada para desenvolvimento do trabalho. Os métodos de ensaio e seus procedimentos experimentais seguem as recomendações de normas técnicas, conforme será mostrado no Quadro 5.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia empregada.



Fonte: O Autor (2018)

Na revisão de literatura técnica, foram obtidas informações a respeito de solos residuais de gnaiss, típicos da região sul do Brasil, e da utilização de aditivos estabilizadores no subleito ou reforço do subleito de pavimentos, tanto rodoviários como ferroviários. Assim como, quais os parâmetros e ensaios utilizados para avaliação da qualidade de um subleito utilizado para este fim.

Em seguida, foi realizada a coleta de solo residual da região de Joinville – SC. O local escolhido para coleta foi uma pedreira localizada próxima a zona industrial da cidade, latitude -26,2637 e longitude -48,9426. O acesso ao local de coleta foi permitido pela empresa de britagem responsável.

Essa amostra foi ensaiada no laboratório de mecânica dos solos do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). As primeiras amostras elaboradas foram de solo puro, ainda sem adição do aditivo químico. Para caracterização física destas amostras, os seguintes ensaios foram realizados:

- Ensaio Granulométrico com sedimentação utilizando solução defloculante;
- Ensaio de Limite de Liquidez (LL);
- Ensaio de Limite de Plasticidade (LP);
- Ensaio de Densidade Real dos Grãos (DRG).

Em seguida, para avaliar as propriedades de resistência do solo natural, realizou-se:

- Ensaio de compactação com energia normal;
- Ensaio de compactação com energia intermediária;
- Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) com energia normal;
- Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) com energia intermediária;

As próximas amostras ensaiadas partiram da adição ao solo do produto estabilizante químico Con-Aid® CBR-Plus, utilizando duas dosagens e dois procedimentos de cura diferentes. As dosagens escolhidas, com base em recomendações do fabricante, foram de 0,3% e 0,45% do produto misturado com água. Já os procedimentos de cura testados são de seis dias com rega uma vez ao dia, conforme recomendação do fabricante, e seis dias sem rega, não recomendado, porém testado, visando otimização do processo real em campo. Sendo assim, os ensaios realizados nesta etapa, para ambas as dosagens, são:

- Ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) com energia intermediária e seis dias de cura com rega;
- Ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) com energia intermediária e seis dias de cura sem rega;
- Ensaios de limite de liquidez (LL);
- Ensaios de limite de plasticidade (LP);

Observando os resultados destes ensaios e comparando-os aos realizados com as amostras naturais, é possível notar algumas mudanças físicas e mecânicas nas propriedades do solo tratado com uso do aditivo. Tais mudanças podem então ser avaliadas e analisadas, tendo como base a aplicação deste solo como subleito em obras de pavimentos. Por fim, a viabilidade da utilização deste produto, para o tipo de solo ensaiado e para fins de estabilização do subleito de pavimentos ferroviários, é discutida.

O Quadro 5 a seguir mostra as normas utilizadas para realização dos ensaios experimentais neste trabalho. Para preparação das amostras, utilizou-se como base a norma ABNT NBR 6457 (2016).

Quadro 5 - Experimentos realizados e suas respectivas normas técnicas tomadas.

Ensaio	Norma Técnica Base
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459/16
Limite de Plasticidade	ABNT NBR 7180/16
Densidade Real dos Grãos	DNER-ME 093/94
Granulometria	ABNT NBR 7181/16
Compactação	ABNT NBR 7182/16
Índice de Suporte Califórnia	ABNT NBR 9895/17

Fonte: O Autor (2018)

3.1 MATERIAIS

Como mencionado, os materiais utilizados no trabalho são: {i} um solo residual de gnaiss coletado em uma pedreira da região de Joinville – SC, e {ii} uma amostra do aditivo químico estabilizante Con-Aid® CBR-Plus, doada por representantes da fabricante no Brasil apenas para fins acadêmicos.

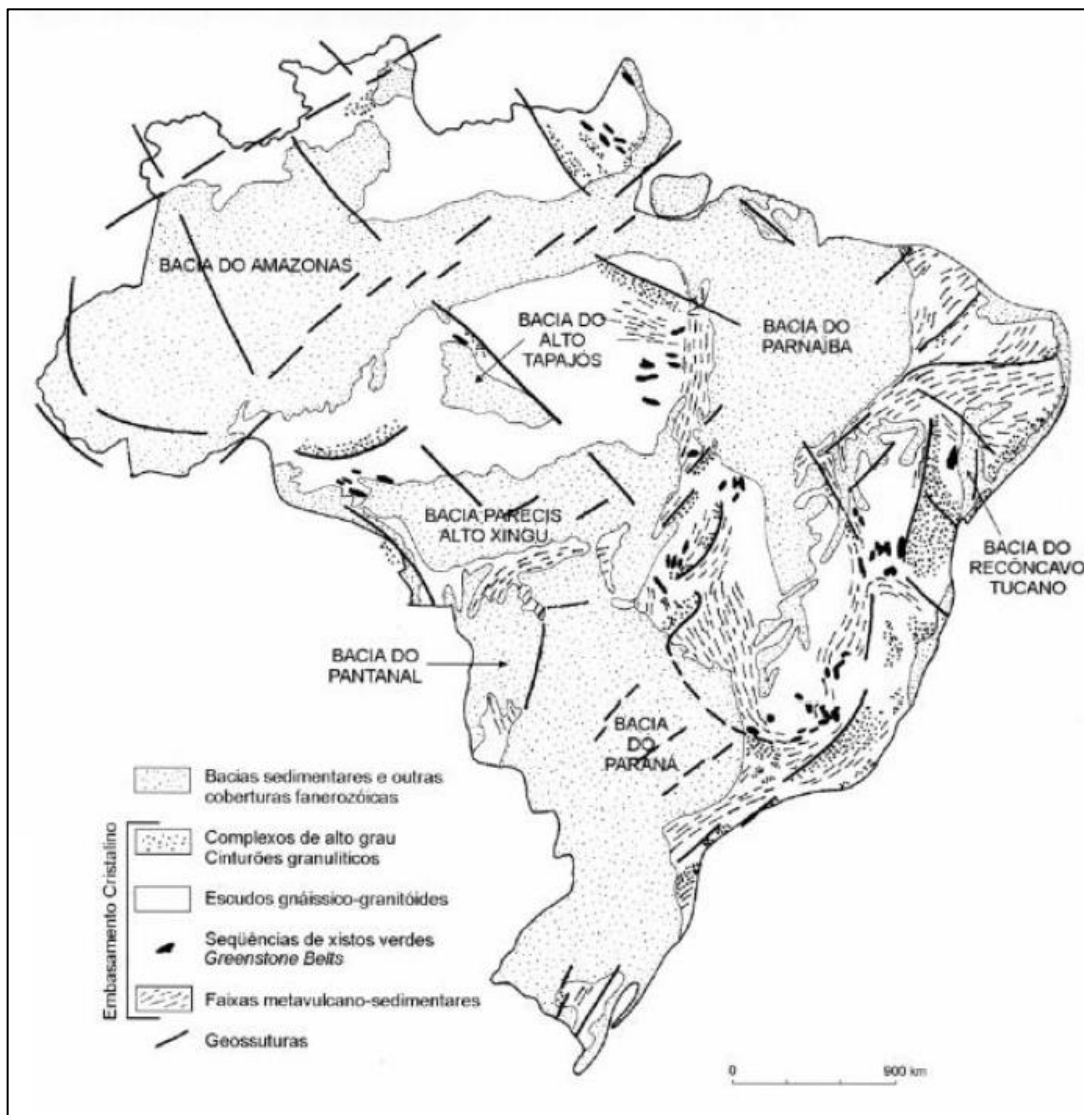
3.1.1 Solo residual de gnaiss

A decisão sobre o tipo de solo escolhido para realização do presente trabalho teve como fundamento utilizar-se de um solo típico da região, que apresente comportamento ruim em aplicações de pavimentação, segundo as classificações SUCS e HRB/TRB. Espera-se assim avaliar as alterações de suas características e comportamento, quando utilizado junto do aditivo estabilizante. Com isso, o solo escolhido foi um material residual de gnaiss que apresenta baixos níveis de capacidade de suporte quando compactado.

Através do mapa geológico do Brasil, mostrado na Figura 6, é possível observar que rochas gnáissicas que potencialmente originam este tipo de solo são comuns em diversas regiões do país, principalmente na região litorânea. Sandroni (1991), citado por Machado (2012), afirma que solos residuais, incluindo os de rochas de gnaiss, abrangem uma área com cerca de três milhões de quilômetros quadrados no Brasil, e encontram-se presentes em todas as regiões.

Solos residuais são formados através do processo de intemperismo, físico e químico, de rochas em seu lugar de origem, ou seja, com praticamente nenhum movimento entre suas partículas com decorrer do tempo. De acordo com Lambe e colaboradores (1979) citado por Godoi (2014), este tipo de solo tende a ser abundante em regiões de clima quente e úmido, pois estes fatores favorecem o intemperismo por ação química.

Figura 6 - Mapa geológico do Brasil.



Fonte: Silveira (2005, p.51).

Solos residuais apresentam alta heterogeneidade, assim como sua rocha de origem. Logo, podem apresentar características e comportamentos distintos, dependendo de sua estrutura, mineralogia, etc (MACHADO, 2012; PINTO, 2006; SILVEIRA, 2005). Por outro lado, suas granulometrias geralmente são caracterizadas como material siltoso, e por isso, solos deste tipo não são recomendados para utilização em camadas de pavimentos (GODOI, 2014; MACHADO, 2006; MAGALHÃES, 2001, SANDRONI (1981) apud SILVEIRA, 2005).

Para os experimentos deste trabalho, coletou-se manualmente, com auxílio de uma pá, uma amostra de 100 kg do solo residual de gnaíse da região. Esta foi obtida no ponto alto de uma pedreira de britagem da região de Joinville – SC (Figura 7).

Figura 7 - Mapa com imagens de satélite do local de coleta das amostras.



Fonte: Google Maps (2018), adaptado pelo autor (2018)

Figura 8 - Foto da amostragem de solo residual.



Fonte: O Autor (2018)

As amostras de solo coletadas apresentam cor avermelhada e torrões de fácil desagregação, com aparência de solo siltoso, sem apresentar alta aspereza como solos arenosos e não viscoso como solos argilosos. As amostras foram então encaminhadas para o laboratório de mecânica de solos do campus da UFSC em Joinville, onde passaram pelo processo de secagem ao ar até atingirem a umidade higroscópica.

3.1.2 Con-Aid® CBR-Plus

De acordo com manual do produto, o Con-Aid® CBR-Plus é um líquido viscoso, com cor avermelhada, que é utilizado como estabilizador químico de solos. Este aditivo foi criado com intuito de impermeabilizar e aumentar a resistência ao cisalhamento das partículas de argila presentes no solo, pois essas são as principais responsáveis pelo acúmulo de água, o que influencia diretamente na resistência do mesmo (SAVAGE, 2011).

O produto foi criado na década de 70, na África do Sul, a partir da ideia de melhorar um produto já existente no mercado, o *Reynolds Road Packer* (RRP). Este, consiste de um produto similar que começou a ser importado da América para África em 1970, porém, não apresentou bons resultados na maioria de suas aplicações (SAVAGE, 2011).

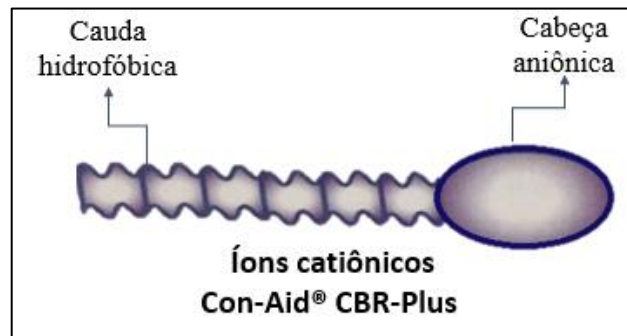
J. J. Grabe, um empreiteiro de construção de estradas com boa experiência na utilização de RRP, obteve ajuda de cientistas para criar o Con-Aid®. Nome dado com referência as palavras *construction aid*, traduzindo para o português: ajuda para construção. Este sendo um produto líquido concentrado que, em pequenas dosagens diluído em água, alcançou bons resultados em testes in-situ. Sendo efetivo no aumento da resistência aos efeitos de amolecimento do solo provocados pela água, e em melhorar a qualidade de compactação (SAVAGE, 2011).

O produto começou a ser exportado a partir de 1990 e empregado em obras de pavimentação em maior nível. Em algumas áreas ficou conhecido como CBR Plus. Atualmente, a logomarca do produto utiliza ambos os nomes (SAVAGE, 2011).

O Con-Aid® tem sua ação de funcionamento centrada em eliminar a água adsorvida na superfície das partículas de argila e impermeabilizá-las. A Figura 9 mostra uma ilustração da partícula iônica do produto, formada por uma cauda hidrofóbica e uma cabeça aniônica. Basicamente, estas partículas repelem os íons metálicos do solo. Sendo assim, uma vez aderido na partícula de argila, a parte negativa da partícula iônica (cabeça) repele e toma o lugar dos íons responsáveis por reter a água absorvida (íons metálicos), já a parte positiva (cauda), repele

toda molécula de água presente que antes seria adsorvida. Este efeito de impermeabilização é dificilmente removível (SAVAGE, 2011).

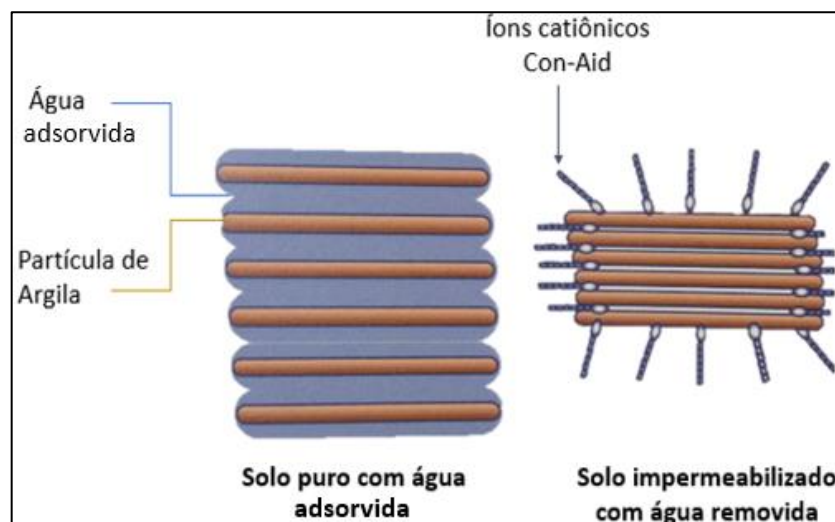
Figura 9 - Ilustração simbólica dos íons do Con-Aid® CBR-Plus.



Fonte: Savage (2011, p. 26), adaptada pelo autor (2018)

Após estabilizado, o solo é compactado, aproximando as partículas de argila uma das outras. Como essas partículas não apresentam mais água adsorvida em sua superfície, essa aproximação é ainda maior, o que é esquematizado na Figura 10 abaixo. A lubrificação hidrofóbica presente nas partículas faz do solo estabilizado uma camada impermeável (SAVAGE, 2011).

Figura 10 - Ilustração mostrando a ação de funcionamento do Con-Aid® CBR-Plus em partículas argilosas.



Fonte: Savage (2011, p. 26), adaptada pelo autor (2018)

Entre os resultados que podem ser atingidos em um solo a partir da aplicação deste aditivo estão (SAVAGE, 2011):

- Redução da expansão provocada pela umidade;
- Aumento da resistência ao cisalhamento;
- Aumento da densidade com menor esforço de compactação;
- Redução da formação de poeira;
- Diminuição da rotina de manutenção.

A aplicação do produto é realizada por maquinário comum em obras de pavimentação, como: moto niveladora, caminhão pipa, trator de pneu com grade de disco, rolo compactador pé de carneiro vibratório e rolo liso vibratório. A dosagem do produto necessária para resultados satisfatórios depende da reatividade e do teor de argila presente no solo. Normalmente estão entre na faixa de 0,2 e 0,5 % do produto diluído em água, sendo que, cem litros do produto rendem aproximadamente 20.000 m² (SAVAGE, 2011).

O processo de aderência ao solo não é imediato, sendo que, após aplicado, o produto ainda necessita de um tempo de cura para melhor efeito da troca iônica no solo. Este tempo varia de solo para solo, dependendo da quantidade e tipo de íons presentes, e também do grau de compactação. Durante esse período, os fabricantes do produto recomendam regar o solo com água, para que se consiga escoar o produto por uma maior espessura de camada de solo possível. Ou seja, a rega tem o intuito de espalhar o produto no solo e aumentar a espessura de aderência do produto (SAVAGE, 2011).

A amostra do produto, obtida para fins deste trabalho, foi doada pela Con-Aid® CBR-Plus Brasil, com sede em Joinville -SC. A Figura 11 abaixo mostra a amostra do produto utilizada.

As duas dosagens utilizadas durante este trabalho, de 0,3 e 0,45 %, partiram apenas de recomendações dos representantes do produto, sem testes de reatividade. Normalmente estas dosagens são utilizadas para solos com baixo teor de argila.

Figura 11 - Amostra de Con-Aid® CBR-Plus doada para pesquisa.



Fonte: O Autor (2018)

3.2 MÉTODOS

Para concluir os objetivos propostos neste trabalho, diferentes ensaios foram realizados. Estes, podem ser divididos em duas categorias: {i} Ensaios de caracterização física, que englobam os ensaios de granulometria, densidade real dos grãos e limites de Atterberg, e {ii} ensaios de caracterização mecânica, que por sua vez, compreendem os ensaios de compactação e os de índice de suporte Califórnia. Todos os ensaios realizados serão descritos nos próximos tópicos.

Observando a sequência dos ensaios mostrado no Quadro 6 abaixo, nota-se que os ensaios são divididos em ensaios com solo natural e com solo aditivado. Sendo que, nos com solo aditivado, testaram-se duas dosagens e dois procedimentos de cura diferentes.

Quadro 6 - Cronograma de ensaios realizados.

Ensaio Realizado		Solo Natural	Solo Aditivado		Procedimento de cura
			Dosagem 0,45%	Dosagem 0,3%	
1º	Limite de Liquidez (LL)	Sim	Sim	Sim	6 dias com rega
2º	Limite de Plasticidade (LP)	Sim	Sim	Sim	6 dias com rega
3º	Densidade Real dos Grãos (DRG)	Sim	-	-	-
4º	Granulometria	Sim	-	-	-
5º	Compactação Energia Intermediária	Sim	-	-	-
6º	Índice de Suporte Califórnia (ISC) Energia Intermediária	Sim	Sim	Sim	6 dias (Testados com e sem rega)

Fonte: O Autor (2018)

Para realização dos ensaios com aditivo, utilizou-se uma proveta de 25 ml, 4 garrafas de 500 ml com água pura e um pequeno funil para preparação da mistura. As dosagens utilizadas neste trabalho referem-se à concentração de 0,3 e 0,45 % de aditivo misturado em água, ou seja, 3 e 4,5 ml de produto para um litro de água.

Sendo assim, primeiramente utilizou-se da proveta para dosar 3 ml do aditivo. Separou-se então, igualmente, esta quantia em duas garrafas de água, com auxílio do funil. Por fim, agitou-se as garrafas para homogeneizar a solução. Para a dosagem de 4,5 ml utilizou-se o mesmo procedimento. A Figura 12 a seguir mostra as garrafas cheias com a mistura.

Figura 12 - Garrafas com líquido estabilizante em dosagens de 0,3% (a direita) e 0,45% (a esquerda) de Con-Aid® CBR-Plus diluído em água pura.



Fonte: O Autor (2018)

3.2.1 Ensaio de limite de liquidez

O ensaio de limite de liquidez tem como objetivo determinar a umidade de transição entre o estado líquido, onde o solo tem capacidade fluir, e o estado onde o solo tem aspecto apenas plástico (CAPUTO, 1988). Para encontrar a umidade de limite de liquidez utilizou-se das normas da ABNT NBR 6459 (2016), e as amostras foram preparadas conforme NBR 6457 (2016).

O ensaio consiste em traçar a linha de escoamento do solo. Para isso, utiliza-se o aparelho de Casagrande para contabilizar o número de golpes necessários para fechar uma ranhura, aberta através do cinzel e com dimensões padronizadas, até atingir espessura aproximada de 10 mm. O limite de liquidez será o valor da umidade onde a ranhura fecha com 25 golpes (CAPUTO, 1988).

O ensaio de limite de liquidez foi realizado para três amostras de solo. Sendo uma com solo natural e duas com solo aditivado com Con-Aid® CBR-Plus e dosagens de 0,3% e 0,45%. A única diferença entre os ensaios com solo natural e aditivado é referente a preparação das amostras.

Para execução de cada ensaio, primeiramente separou-se uma amostra de 200 gramas do solo residual, passante na peneira de 0,42 mm, conforme a norma ABNT NBR 6475 (2016). Para os ensaios com aditivo, após separadas, as amostras receberam a mistura de água mais aditivo com dosagem pré-definida. A quantidade da mistura adicionada é referente a quantidade de água necessária para solo alcançar a umidade próxima a ótima (h_o).

Após receber o aditivo, o solo com produto foi misturado, com auxílio de uma espátula grande, por 15 minutos, e deixado em repouso por seis dias para cura do produto. Para este ensaio, optou-se por realizar a cura de acordo com as recomendações do fabricante, regando o solo uma vez ao dia, com um borrifador de água, durante este período. Finalizado o tempo de cura a amostra está pronta para ser ensaiada.

A partir deste ponto, o procedimento descrito permanece o mesmo independente do material ensaiado. O processo normatizado, basicamente, consiste em umedecer o solo com água destilada, adicionar uma quantia no aparelho de Casagrande, criar a ranhura com o cinzel (Figura 13), contabilizar o número de golpes para esta fechar, retirar uma amostra, pesa-la e, por fim, leva-la até a estufa em 105 °C. Isso para que, depois de 24 horas, a amostra possa ser pesada novamente para cálculo da umidade.

As próximas contagens ocorrem após adicionar mais uma pequena quantia de água ao solo, misturando-o e repetindo o processo descrito anteriormente. Foram realizadas seis contagens de golpes no total para cada amostra ensaiada, todos para umidades diferentes.

Figura 13 - Foto do solo inserido na concha do aparelho de Casagrande e pronto para ser ensaiado.



Fonte: O Autor (2018)

Após 24 horas, as amostras do solo seco (através da estufa) foram pesadas novamente. Com isso, a razão entre a massa de água (M_a) e a massa de sólido (M_s) é calculada para encontrar a respectiva umidade (h) de cada amostra, através da equação mostrada abaixo (CAPUTO, 1988):

$$h\% = \frac{M_a}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Através dos valores de umidade calculados, consegue-se plotar a linha de escoamento do solo em um gráfico de número de golpes para fechamento da ranhura versus umidade. Para que por fim, seja possível determinar o valor de limite de liquidez, ou umidade referente ao fechamento da ranhura em 25 golpes.

3.2.2 Ensaio de limite de plasticidade

A medida que o solo vai perdendo umidade sua consistência vai sendo alterada. A umidade de transição entre os estados plástico e semi-sólido, onde o solo começa a se desmanchar, é chamado de limite de plasticidade (CAPUTO, 1988). Este limite é encontrado através de um ensaio não mecanizado normatizado pela norma ABNT NBR 7180 (2016).

O ensaio basicamente consiste em moldar uma amostra de solo até que o mesmo alcance as dimensões de um cilindro, com aproximadamente 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, como mostrado na Figura 14. Para facilitar a execução do ensaio, utilizou-se de uma chapa de vidro com superfície texturizada, um gabarito cilíndrico para comparação e uma espátula de 80 mm de comprimento e 20 mm de largura.

Este ensaio foi realizado para solo natural e aditivado com dosagens de 0,3% e 0,45% de Con-Aid® CBR-Plus em água. Para amostras aditivadas, utilizou-se dos mesmos processos de preparação e cura descritos no tópico anterior.

Primeiramente foi preparada uma amostra de 200 g de solo passante na peneira de 0,42 mm, conforme a norma ABNT NBR 6457 (2016). A amostra foi então homogeneizada com uma pequena quantidade de água destilada em uma cápsula de porcelana, por aproximadamente 30 minutos. Em seguida, uma pequena amostra foi retirada e moldada sobre a placa de vidro, utilizando as mãos e a espátula, até alcançar as dimensões aproximadas do gabarito.

Figura 14 – Solo moldado no ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: O Autor (2018)

Com a amostra moldada nas dimensões determinadas pela norma, o corpo de prova foi colocado em uma cápsula e levado até a estufa em temperatura de 105 °C, para que, depois de 24 horas, possa ser calculada sua umidade conforme a Equação 1.

No total, testaram-se seis amostras moldadas para determinação da umidade (tanto para o solo natural como aditivado). O valor de umidade encontrado de no mínimo três amostras, quando não diferem da respectiva média deles em mais de 5%, são considerados satisfatórios. Sendo assim, o limite de liquidez será igual umidade média entre as amostras ditas satisfatórias.

A partir do limite de plasticidade (LP) e do limite de liquidez (LL), é possível calcular o índice de plasticidade do solo (IP). Este índice está relacionado com o intervalo de umidade onde o solo tem comportamento plástico e pode ser calculado através da Equação 2, mostrada abaixo (CAPUTO, 1988).

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

3.2.3 Ensaio de densidade real dos grãos

Para determinar a densidade real das partículas do solo, utilizou-se da norma técnica do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) ME-093 (1994). A norma descreve o método de ensaio com utilização de picnômetros.

Para realização do ensaio, separou-se cerca de 30 gramas do solo residual puro, passante na peneira de número 10 (2 mm) e previamente seco na estufa a 105 °C. Além de três picnômetros de 25 ml, uma garrafa de água destilada e um pote com água em temperatura ambiente.

Primeiramente, os picnômetros foram pesados em uma balança de precisão e suas massas foram anotadas (P_1). Em seguida, cerca de 10 g de amostra de solo foi adicionada em cada picnômetro com auxílio de um funil e pesou-se novamente o conjunto de picnômetro mais solo (P_2).

Com isso, os picnômetros tiveram seu volume livre preenchido com água destilada, foram aquecidos até o ponto de ebulição, e então, mantidos nesta condição por 15 minutos para eliminar o ar presente nas amostras. Durante o processo os picnômetros foram levemente agitados com objetivo de evitar superaquecimento.

Após aquecidos (Figura 15), os picnômetros foram resfriados ao ambiente por 15 minutos e, posteriormente, em banho de água com temperatura conhecida por também 15 minutos. Em seguida, pesou-se os picnômetros por mais uma vez (P_3).

Figura 15 - Foto de dois picnômetros separados após o banho de água do ensaio de densidade real dos grãos.



Fonte: O Autor (2018)

Por fim, os picnômetros foram devidamente limpos e preenchidos, desta vez, apenas com água destilada, para que em seguida pudessem ser encaminhados ao segundo banho de água por 15 minutos. Com isso, pesou-se os picnômetros pela última vez (P_4).

A partir das massas anotadas durante o ensaio, foi então possível calcular o valor de densidade do solo ($\gamma_{s,t}$), na temperatura ambiente, por meio da Equação 3 abaixo.

$$\gamma_{s,t} = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (3)$$

O valor de densidade real dos grãos deve ser referido à água em temperatura (t) de 20°C. Como a temperatura ambiente, e de banho durante o ensaio, foi de 24°C, o valor de densidade calculado ($\gamma_{s,t}$) foi corrigido utilizando a Equação 4.

$$\gamma_{s,20} = k_{20} \times \gamma_{s,t} \quad (4)$$

Onde:

$\gamma_{s,20}$ = Densidade real do solo a 20 °C;

K_{20} = Fator de correção tabelado na norma (Para 24 °C, o fator de correção é de 0,9991);

$\gamma_{s,t}$ = Densidade real do solo na temperatura ambiente.

O resultado do ensaio é considerado satisfatório apenas se os valores obtidos, de no mínimo duas amostras, não diferem 0,009 da média entre elas.

3.2.4 Granulometria

Através da granulometria, quantifica-se a fração de partículas pertencentes aos grupos de argilas, siltes, areias e pedregulhos, presentes em um determinado solo. O que difere um grupo de outro é o tamanho e forma de suas partículas. Conhecendo as dimensões das partículas, pode-se plotar a curva granulométrica do solo utilizando a escala granulométrica brasileira, padronizada pela ABNT (CAPUTO, 1988).

Para obter a curva granulométrica do solo estudado, seguiu as normas ABNT NBR 7181 (2016) e, para preparação da amostra, a NBR 6457 (2016). Primeiramente realizando a sedimentação e posteriormente os peneiramentos (fino e grosso).

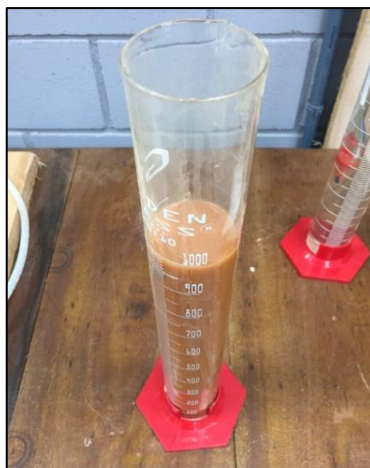
Para a preparação da amostra ensaiada, foi separado 1 kg de solo destorroado na umidade higroscópica. Este solo foi peneirado na peneira de 2 mm, com objetivo de dividir os grãos finos dos grossos. Em seguida, lavou o material retido na peneira para eliminar as partículas finas ainda presentes. Feito isso, o material que permaneceu na peneira foi então transferido para uma cápsula e encaminhado para estufa a 105 °C, para posteriormente ser utilizado no peneiramento grosso.

Do material passante na peneira número 10 (2 mm de abertura) separou-se uma amostra de 170 g. Sendo que, desta quantia, tomou-se 100 g para determinação da umidade higroscópica, calculada após 24 horas na estufa. Já o restante da amostra (70 g), foi imergido em uma solução defloculante a base de hexametáfosfato de sódio, com concentração padronizada pela norma, em um béquer de 250 ml. A mistura foi agitada por 10 minutos e, em seguida, permaneceu em repouso por 24 horas.

Após o tempo de repouso, o material do béquer foi transferido para o copo do aparelho de dispersão e submetido a ação dispersora por 15 minutos. Com isso, a mistura foi transferida para uma proveta e água destilada foi adicionada até alcançar a marca de 1000 ml (Figura 16).

Efetuaram-se leituras de densidade com um densímetro e de temperatura utilizando um termômetro, conforme os tempos padronizados pela norma.

Figura 16 - Foto da proveta durante o ensaio de sedimentação realizado.



Fonte: O Autor (2018)

Depois da última leitura, o material sólido presente na proveta foi peneirado na peneira de 0,075 mm. A parte retida foi então lavada sobre a peneira (com água potável à baixa pressão), transferida para uma cápsula e encaminhada para secagem em estufa.

O próximo passo do ensaio de granulometria foi o peneiramento fino e grosso das amostras retiradas da estufa após 24 horas de secagem. Para o peneiramento fino, utilizou-se a amostra proveniente do ensaio de sedimentação e as peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 mm. Já para o peneiramento grosso, foram utilizadas as peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm para peneirar o material que ficou retido na peneira de 2 mm. Todas as massas retidas foram anotadas.

Através das massas retidas em cada peneira, da umidade higroscópica inicial, dos valores de densidade medidos durante a sedimentação (calibrados para temperatura constante de 20 °C) e da massa específica dos grãos e da água, pode-se traçar a curva granulométrica do solo. Todos os cálculos utilizados para gerar a curva são normatizados na norma ABNT NBR 7181 (2016).

3.2.5 Ensaio de compactação

Ensaio de compactação são utilizados para quantificar a variação da massa específica aparente seca (γ_d), em função do teor de umidade (h), para um determinado solo. Com isso, pode-se então plotar um gráfico de curva para determinação da umidade ótima (h_o) (CAPUTO, 1988). Este ensaio foi realizado conforme recomendações da norma técnica ABNT NBR 7182 (2016).

Como mencionado no Tópico 2.3.2, três energias de compactação diferentes podem ser utilizadas neste ensaio. No presente trabalho, optou-se por realizar ensaio com energia intermediária em cilindro grande (de aproximadamente 2006 cm³). A Figura 17 mostra os materiais utilizados durante o ensaio.

Figura 17 - Foto dos materiais utilizados para o ensaio de compactação com cilindro grande.



Fonte: O Autor (2018)

Para começar o ensaio, separou-se cerca de 5 kg de solo natural seco, com umidade conhecida. O solo foi então homogeneizado com uma quantidade de água conhecida (para que o teor de umidade desejado e presumido seja alcançado), e então, foi compactado no cilindro utilizando o soquete e um disco espaçador. A compactação foi obtida utilizando 5 camadas e 26 golpes por camada, conforme o Quadro 4, apresentado no Tópico 2.3.2.

Após a compactação, retirou-se o excesso de solo e pesou-se o conjunto cilindro mais material compactado. Então, retirou-se todo o solo de dentro do cilindro, com auxílio de um pistão pneumático adequado para este fim (Figura 18), e coletou-se uma amostra. A amostra é então colocada em uma cápsula, com massa conhecida, onde pesa-se o conjunto e, por fim, encaminha-o para a estufa.

Figura 18 - Foto do solo compactado por ensaio compactação em cilindro grande.



Fonte: O Autor (2018)

O processo descrito acima repete-se após desagregação do solo compactado anteriormente. Adiciona-se mais uma quantia de água e realiza-se uma nova compactação. Cada compactação realizada corresponde a um novo ponto para a curva de compactação. No presente trabalho foram executados no mínimo cinco.

Depois de secas, retirou-se as amostras da estufa e pesou-se por mais uma vez. Com isso, é possível calcular o teor de umidade do solo compactado através da Equação 1. O valor da massa específica (γ_d), referente a umidade (h) já calculada, é obtida por meio da seguinte equação:

$$\gamma_d = \frac{Ph \times 100}{V_{cil} \times (100 + h)} \quad (5)$$

Onde:

γ_d = Massa específica seca [g/cm^3];

Ph = Peso úmido do solo compactado, descontando o peso do cilindro [g];

V_{cil} = Volume do cilindro utilizado [cm^3];

h = Teor de umidade [%].

Através dos pontos obtidos, traça-se a curva de compactação do solo. O valor da umidade referente a massa específica máxima ($\gamma_{d, \max}$) é então definida como umidade ótima (h_o) do solo (Ver Figura 4).

3.2.6 Ensaios de índice de suporte Califórnia (ISC)

O ensaio de ISC (Índice de suporte Califórnia) tem o objetivo de avaliar a capacidade de suporte de um determinado solo compactado. Essa avaliação, como já mencionado, é baseada na comparação dos resultados obtidos no ensaio, com os de uma amostra de brita graduada, adotada como padrão de referência. Além da resistência, ensaios de ISC também quantificam a expansão durante o período de imersão em água (CAPUTO, 1988; SANTOS, 2005; SENÇO, 2007).

Os ensaios de ISC realizados neste trabalho seguem as recomendações da norma ABNT NBR 9895 (2017). Foram ensaiadas amostras compactadas de solo natural e aditivado, na umidade ótima, utilizando energias de compactação Proctor intermediária. No total, cinco ensaios foram executados, são eles:

- Um ensaio ISC para o solo natural com energia intermediária;
- Um ensaio ISC para o solo aditivado com dosagem de 3 ml de Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] para cada 1000 ml de água, energia intermediária e curado com rega;
- Um ensaio ISC para o solo aditivado com dosagem de 3 ml de Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] para cada 1000 ml de água, energia intermediária e curado sem rega;
- Um ensaio ISC para o solo aditivado, com dosagem de 4,5 ml de Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] para cada 1000 ml de água, energia intermediária e curado com rega;
- Um ensaio ISC para o solo aditivado, com dosagem de 4,5 ml de Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] para cada 1000 ml de água, energia intermediária e curado sem rega;

3.2.6.1 Ensaio de ISC para solo natural

Neste trabalho, realizou-se um ensaio de ISC para o solo residual sem aditivo, um com energia de compactação intermediária e utilizando o cilindro grande (2006 cm²). Para moldar o corpo de prova utilizou-se de 5 kg de solo.

Seguiu-se passo-a-passo todas as recomendações da norma: resumidamente compactando, imergindo em água e depois rompendo os corpos de prova na prensa manual e realizando as leituras da penetração do pistão em função do tempo.

Durante o período de imersão em água, um relógio extensômetro foi instalado no cilindro de ISC. Com o fim deste período, o valor de deslocamento mostrado no relógio é relacionado com a expansão do solo puro por efeitos da umidade.

3.2.6.2 Ensaio de ISC para solo aditivado e curado sem rega

A única diferença entre o ensaio de ISC com solo natural e aditivado, é o processo de preparação dos corpos de prova. O processo de imersão e ruptura dos mesmos permanece como já descrito.

Assim como nos ensaios sem aditivo, foram separadas duas amostras de 5 kg de solo em duas bacias. Adicionou-se então uma quantidade da solução aditiva, referente a quantidade de água necessária para o solo alcançar a umidade ótima. Cada bacia recebeu uma das duas dosagens de aditivo pré-definidas. Misturou-se o solo com o produto até homogeneização, e então, compactou-se essas em um cilindro grande, através do mesmo processo já descrito.

Antes de ser submerso em água, os cilindros permaneceram em repouso durante seis dias para o produto curar (Figura 19), porém sem utilização de rega. Isso para testar a performance do produto quando utilizado de forma mais economicamente atrativa para aplicações em campo.

Figura 19 - Corpos de prova com solo aditivado, utilizados nos ensaios de ISC, durante o período de cura.



Fonte: O Autor (2018)

Os procedimentos realizados a seguir, permanecem os mesmos conforme descrito na norma que rege o ensaio.

3.2.6.3 Ensaio de ISC para solo aditivado e curado com rega

Para ensaios com cura, as duas amostras de 5 kg de solo aditivado permaneceram seis dias em processo de cura com rega uma vez ao dia, antes de serem compactadas. Este é o procedimento de aplicação recomendado por representantes da fabricante no Brasil.

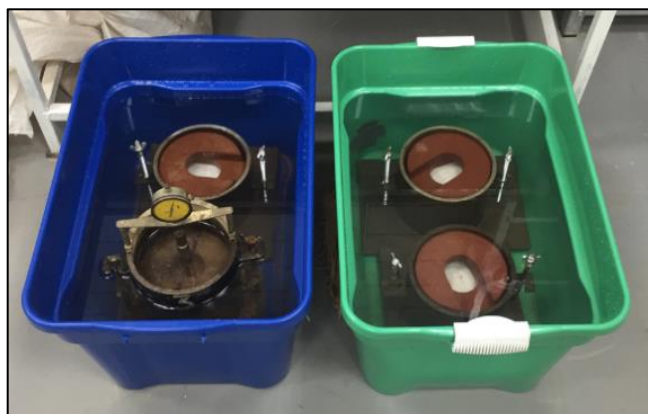
O processo de rega implementado, consistiu em utilizar um borrifador de água para umedecer o solo, uma vez ao dia, com intuito de manter o solo na umidade ótima, visualmente, durante todo período de cura. Após o quinto dia, uma amostra de 40 g de solo foi coletada, pesada e levada a estufa, o restante do solo foi armazenado num saco plástico vedado, para manter sua umidade.

Ao final do período de cura, a amostra é retirada da estufa e pesada novamente, com isso, calculou-se a umidade presente no solo. Conhecendo sua umidade, é possível calcular a massa de água que deve ser adicionada para alcançar a umidade ótima. Para as amostras realizadas neste trabalho, não foi adicionado mais água, pois a umidade do solo calculada já estava em 26 %, ou seja, 1 % a mais que a umidade ótima.

Os processos de compactação, submersão e ruptura dos corpos de prova foram os mesmos já descritos. O corpo de prova referente a dosagem de 0,45 % do aditivo foi incrementado com o relógio extensômetro para obtenção da expansão, essa que será comparada com a expansão do solo compactado sem o aditivo.

A Figura 20 abaixo mostra todos os corpos de prova de ISC testados com a utilização do aditivo. Apenas um relógio extensômetro foi adaptado pois o laboratório não possuía mais disponíveis.

Figura 20 - Foto dos quatro corpos de prova ensaiados, com solo aditivado, durante o período de submersão em água.



Fonte: O Autor (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos através dos ensaios de laboratório realizados durante este trabalho. Os resultados obtidos com solo aditivado serão comparados aos com solo natural, para assim, avaliar as mudanças de propriedades presentes através do uso do estabilizante em um solo residual gnaisse, comum da região de Joinville - SC.

As novas propriedades do solo serão analisadas com objetivo de avaliar a utilização do aditivo estabilizante no subleito de pavimentos rodoviários e ferroviários. Para isso, os resultados obtidos serão comparados as propriedades mínimas recomendadas, e apresentadas no Tópico 2.3, que um solo deve possuir para poder ser utilizado para este fim.

4.1 LIMITES DE ATTERBERG

Neste trabalho foram realizados ensaios de Limites de Atterberg tanto para o solo natural, como para o aditivado. O Quadro 7 apresenta os resultados com solo natural e os Quadros 8 e 9, os com solo aditivado.

Através dos valores de LL e LP obtidos pelos ensaios, foi calculado o índice de plasticidade, pela Equação 2.

Quadro 7 - Resultados de Limites de Atterberg e índice de plasticidade para o solo residual de gnaisse natural.

Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
44,7	36	8,7

Fonte: O Autor (2018)

Comparando os resultados obtidos com os recomendados no Tópico 2.3, observa-se que o solo natural não satisfaz os requisitos de LL menor ou igual a 40 % para aplicações como subleito em pavimentos ferroviários.

Quadro 8 - Resultados de Limites de Atterberg e índice de plasticidade para o solo residual de gnaisse aditivado, com dosagem de 0,3% de Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] em água.

Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
42 %	33,5 %	8,5 %

Fonte: O Autor (2018)

Quadro 9 - Resultados de Limites de Atterberg e índice de plasticidade para o solo residual de gnaisse aditivado, com dosagem de 0,45% de Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] em água.

Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
41 %	36 %	5 %

Fonte: O Autor (2018)

Observando os resultados obtidos, nota-se que aditivo pouco diminuiu os valores de LL e LP para a dosagem de 0,3 %. Já para dosagem de 0,45 % o aditivo apenas diminuiu o valor de LL, sem alterar o valor de LP, que permaneceu o mesmo que o obtido para o solo natural. Em ambas as dosagens, o produto diminuiu o índice de plasticidade do solo, sendo assim, teoricamente diminuiu sua plasticidade. Porém, essa diminuição não é considerada significativa, visto que a margem de erro para este ensaio é alta e a diferença entre os valores é baixa.

Segundo Caputo (1988), os valores de IP obtidos para o solo natural e aditivado com 0,3 % classifica-os como mediantemente plástico. Por outro lado, o obtido com solo aditivado com dosagem de 0,45 % classifica-o como fracamente plástico.

Através das características recomendadas para subleitos de pavimentos ferroviários, apresentadas no Tópico 2.3, observa-se que o solo aditivado com dosagem de 0,45 % atingiu um valor de IP adequado (menor que 15 %), porém, a redução do valor de LL não foi suficiente para alcançar o limite recomendado de 40 % ou menos.

4.2 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

Os resultados obtidos de densidade real dos grãos (DRG) para o solo natural, apurados através do ensaio normalizado DNER ME – 093 (1994) e das Equações 3 e 4, são mostrados no Quadro 10 a seguir.

Como já mencionado, os pesos P1, P2, P3 e P4 são referentes as respectivas massas do picnômetro: massa vazio, massa com solo, massa com solo após banho e massa com água após banho. A temperatura ambiente, e de banho, durante o ensaio foi de 24 °C, medida através

de um termômetro. Logo, como o valor da DRG ($\gamma_{s,t}$) deve ser obtida para água a 20 °C, o valor final foi corrigido multiplicando-o com um fator de correção (k_{20}) de 0,9991, tabelado pela norma.

Quadro 10 - Resultados obtidos durante o ensaio de Densidade Real dos Grãos (DRG) para o solo natural.

Número Picnômetro	P1	P2	P3	P4	$\gamma_{s,t}$ [g/cm ³]	$\gamma_{s,20}$ [g/cm ³]
1	17,46	32,74	52,64	43,13	2,648	2,645
2	14,6	29,85	53,86	44,37	2,647	2,645
3	14,58	29,66	54,24	44,37	2,894	2,8918

Fonte: O Autor (2018)

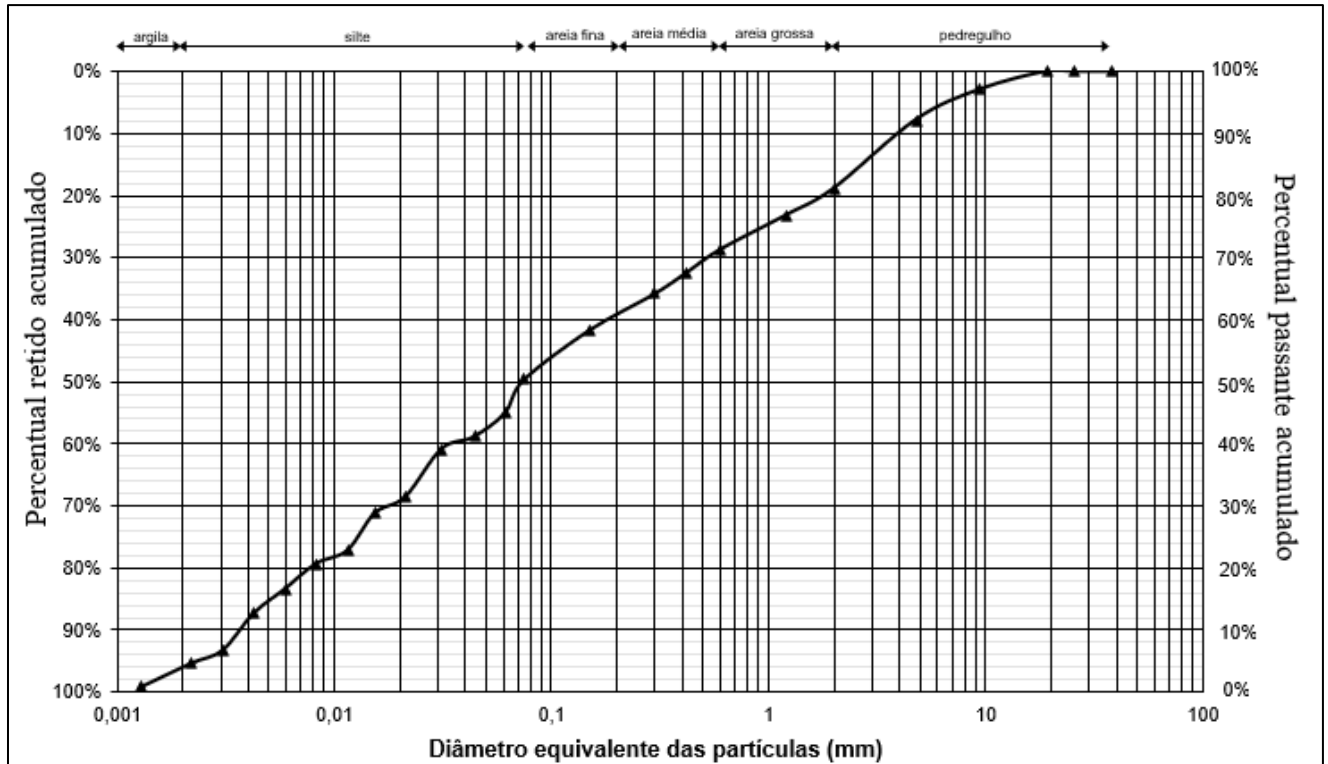
Observando os resultados, nota-se que as densidades obtidas através dos picnômetros 1 e 2 são satisfatórias, pois não diferem em 0,009 da média entre elas. Sendo assim, a densidade real dos grãos do solo residual de gnaiss estudado é de 2,64 g/cm³.

4.3 GRANULOMETRIA

A curva granulométrica encontrada através do ensaio de granulometria, com sedimentação e peneiramento como recomendado pela norma ABNT NBR 7181 (2016), é mostrado no Gráfico 4. O Quadro 11 mostra a fração de cada grupo de partículas, com base na escala granulométrica brasileira (ABNT), que constituem o solo residual de gnaiss estudado.

Como mencionado, o ensaio granulométrico foi realizado apenas para o solo natural e com uso de defloculante. O objetivo do ensaio é conhecer o teor dos constituintes do solo dando ênfase para a quantidade de argila, sendo esse, o único grupo que teoricamente reage com o aditivo.

Gráfico 4 - Curva granulométrica para o solo residual de gnaiss estudado.



Fonte: O Autor (2018)

Quadro 11 - Resultados para fração dos constituintes do solo, obtidos através da curva granulométrica.

Fração de Pedregulho [%]	19
Fração de Areia Grossa [%]	10
Fração de Areia Média [%]	10
Fração de Areia Fina [%]	11
Fração de Silte [%]	46
Fração de Argila [%]	4

Fonte: O Autor (2018)

Observa-se que o solo apresenta apenas 4 % de partículas do tamanho referente a argila, sendo constituído principalmente de silte e areia. Esse valor assemelha-se aos valores obtidos por outros autores para este tipo de solo residual em seus estudos, como os obtidos por Godoi (2014), apresentados no Quadro 2 deste trabalho. De acordo com Savage (2011), para o teor de argila obtido, o aditivo pode não apresentar resultados satisfatórios, pois o mesmo é apenas indicado para solos com 5 % ou mais deste material.

Utilizando os resultados obtidos para os limites de Atterberg e granulometria, pode se calcular o índice de grupo do solo (IG) pela Equação 6, e assim, obter todos os valores

necessários para classificar o solo segundo os quadros HRB e SUCS. O valor de índice de grupo (IG) é calculado utilizando a porcentagem de solo passante na peneira número 200 (0,075 mm) (P_{200}), assim como, os valores de LL e IP (SENÇO, 2007). Para o solo estudado o valor IG calculado é de 1,36.

$$IG = (P_{200} - 35) \times [0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01 \times (P_{200} - 15) \times (IP - 10) \quad (6)$$

De acordo com o quadro HRB (Quadro 1), o solo estudado classifica-se como um solo silteoso pertencente ao grupo A-5. Este grupo pertence a faixa de regular a ruim, em aplicações de pavimentos rodoviários. Já de acordo com o quadro SUCS (Quadro 3), consiste de um solo silto-argiloso que se encaixa na classificação do grupo ML.

Observando o Quadro 12, fornecido pelos fabricantes do produto e mostrado na página seguinte, pode-se observar quais efeitos de estabilização são esperados para os diferentes grupos classificados pela HRB, quando utilizado o Con-Aid[®]/CBR-Plus[®]. Sendo assim, nota-se que para um solo do tipo A-5, como o estudado, a aplicação do produto não é, a princípio recomendada, pois o solo apresenta, teoricamente, teores baixos de argila e presença de mica, materiais estes que não reagem com o aditivo.

Quadro 12 - Tabela que relaciona o tipo de solo, de acordo com a HRB, e o efeito esperado para a estabilização utilizando Con-Aid®/CBR-Plus®.

Classificação	Comentários	Aumento de CBR	Tipo de Estabilização	Controle do Desprendimento de Pó.
A 1	Não Aplicável.			
A2 -4 E A2 - 5	Solos que estão quase no limite para reação com o produto, pois a fração de "finos" é menos plástica. Haverá uma menor resposta visual.	60 % a 100 %	Facilita a Compactação e Estabiliza os materiais "finos".	Pouca redução do desprendimento de pó.
A 2 - 6 E A2 - 7	Solos muito bons estruturalmente. Possuem ótimo CBR e ótima fração de "finos" para reação com Con-Aid/CBRPlus.	80% A 120%	Facilita a Compactação e Estabiliza materiais "finos" e "argilosos".	Boa redução do desprendimento de pó, por haver mais material pétreo e menos silte.
A 3	Areias Limpas. Não Aplicável.			
A 4	Solos onde o melhoramento a nível estrutural será bom.	80% a 100%	Facilita a compactação.	Pouca redução do desprendimento de pó.
A 5	Siltes com presença de "Mica". Não Aplicável.			
A 6	Solos apresentarão um melhor melhoramento visual. Notória redução do Índice de Plasticidade e Expansão.	100 - 300%	Estabilização das Argilas.	Média redução do desprendimento de pó. Notória rapidez da secagem da pista após as chuvas.
A7-5	Bom melhoramento da estrutura do solo. Porém são solos muito instáveis, com boa presença de silte. Cuidados especiais na umidade de compactação.	200 - 400%	Estabilização dos "finos". Facilita a compactação	Média redução do desprendimento de pó como na rapidez da secagem da pista após chuvas.
A7-6	Grupo de solo onde o melhoramento será mais evidente em relação ao solo "in natura"	300 - 500%	Estabilização das Argilas	Ótima redução do desprendimento de pó. Notória rapidez da secagem da pista após as chuvas.
A 8	Solos altamente orgânicos (turfa). Não Aplicável.			

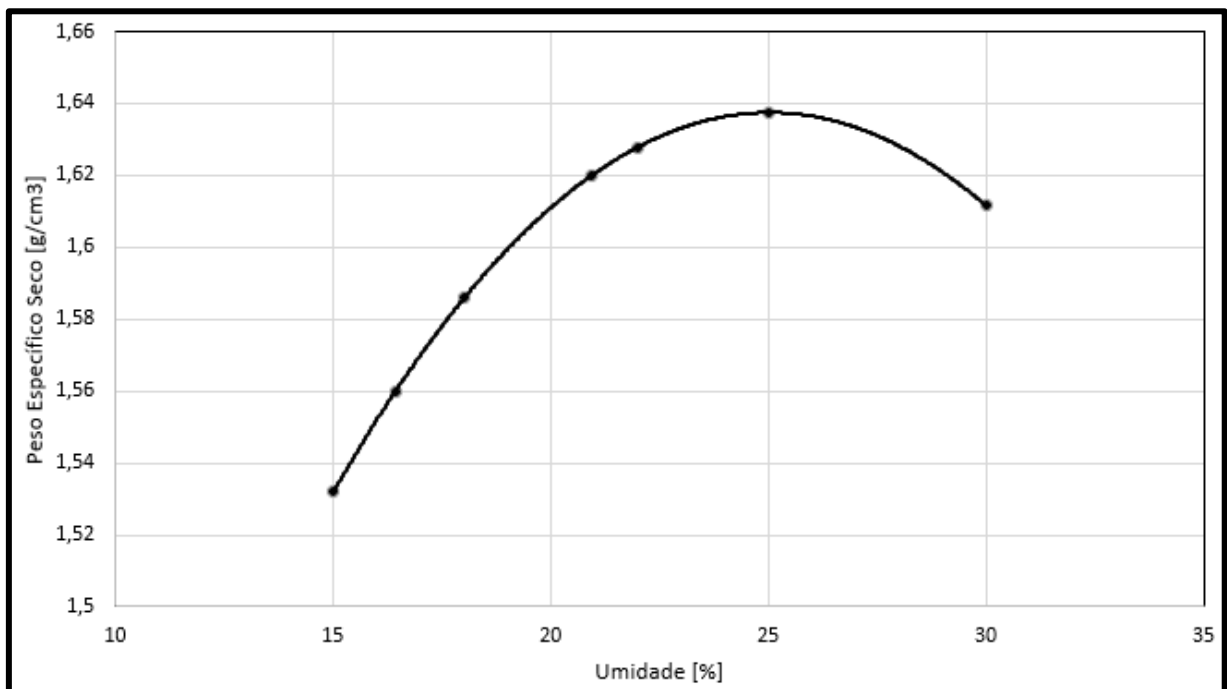
Fonte: Fornecido pelos representantes do produto no Brasil (2018)

4.4 COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação foram realizados apenas para o solo residual de gnaiss natural, sem uso do aditivo, para obtenção da curva de compactação e umidade ótima. O ensaio foi realizado utilizando energia intermediária e cilindro grande.

O resultado do ensaio é mostrado nos Gráficos 5 seguir, sendo que foi necessário realizar uma interpolação polinomial de Lagrange, pois alguns pontos resultantes do ensaio apresentavam-se deslocados.

Gráfico 5 - Curva de compactação obtida com energia intermediária para o solo natural compactado em cilindro grande.



Fonte: O Autor (2018)

Através do gráfico, pode-se observar que o teor de umidade ótimo obtido para o solo estudado, quando compactado com energia intermediária, é de aproximadamente 25 %. Este resultado está próximo ao encontrado por Fernandes (2015) em seu estudo utilizando solo residual de gnaiss, apresentado no Tópico 2.3.2.

4.5 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Foram ensaiados, no total, cinco corpos de prova de ISC durante o trabalho, sendo: um para o solo natural, dois para o solo aditivado com dosagem de 0,3 % de produto em água, e dois para o solo aditivado com dosagem de 0,45 %. Testou-se dois procedimentos de cura diferentes para as amostras aditivadas, seis dias com e sem rega, como já mencionado no Tópico 3.

Por falta de relógios extensômetros no laboratório, realizou-se apenas duas leituras de expansão durante o período de quadro dias de imersão em água, uma para o solo natural, e outro para o solo aditivado com a maior dosagem (0,45 %) e curado como recomendado pelo fabricante (Seis dias com rega). Ambos compactados em energia intermediária.

Os resultados de expansão são mostrados no Quadro 13, abaixo.

Quadro 13 - Resultados obtidos para expansão do solo natural e aditivado.

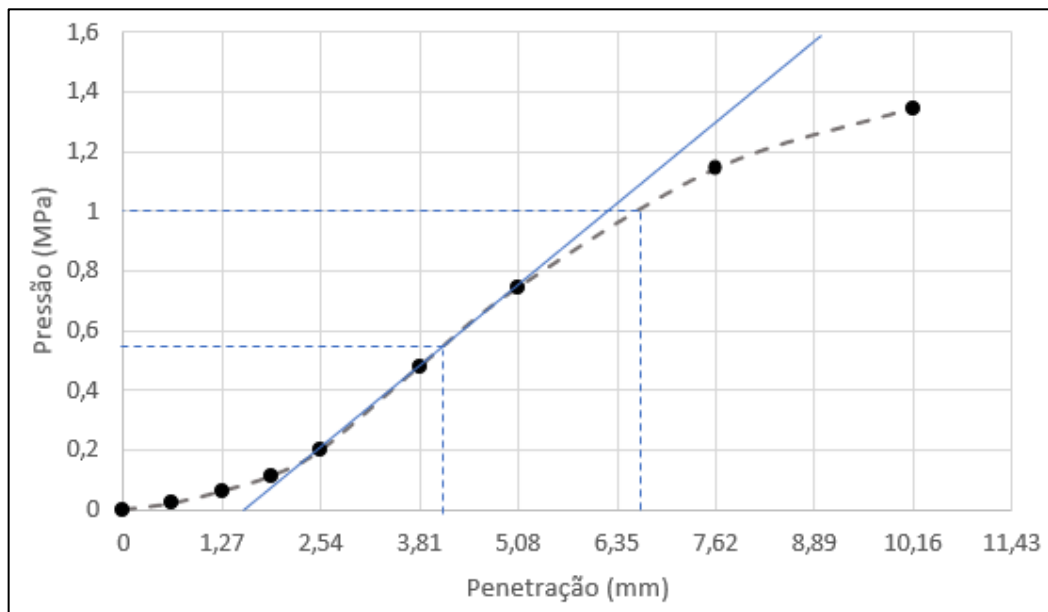
Corpo de Prova	Solo Natural	Solo Aditivado com dosagem de 0,45 % e curado com rega
Expansão	2,58 %	0,7 %

Fonte: O Autor (2018)

Observa-se que o solo aditivado apresentou redução de 70 % da expansão quando comparado ao solo natural. Esta redução, teoricamente acontece devido a impermeabilização das partículas de argila, que deixam de absorver a água responsável pelos efeitos de expansão em solos, conformem sugerem Caputo (1988) e Savage (2011).

O Gráfico 6 a seguir mostra os resultados do ensaio de ISC para o solo natural. A curva obtida estava deslocada, sendo assim, foi corrigida conforme recomendações da norma técnica ABNT NBR 9895 (2017).

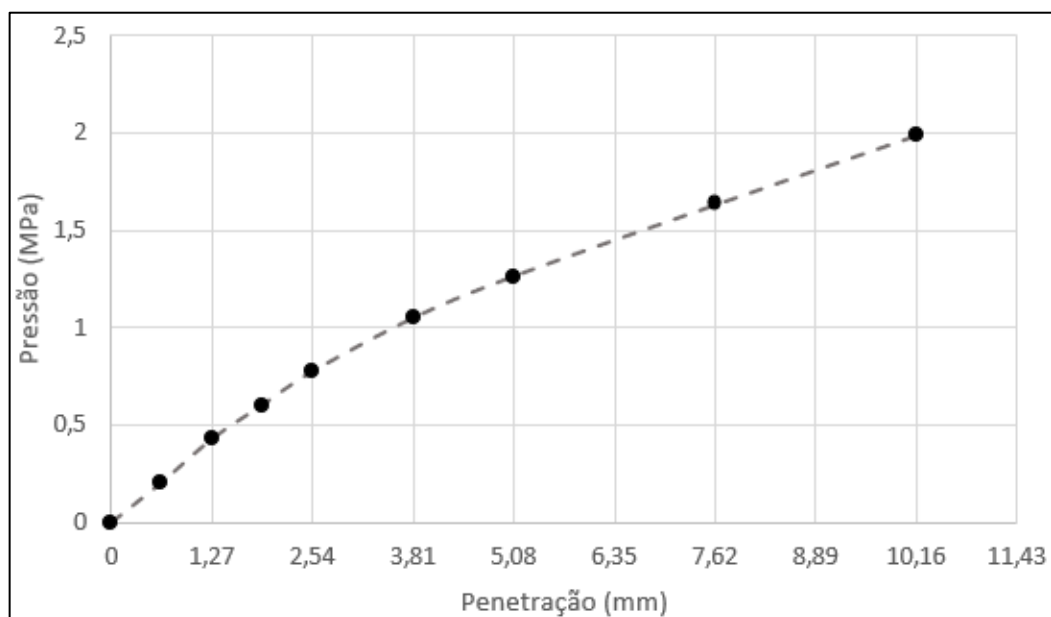
Gráfico 6 - Curva obtida (corrigida) durante o ensaio de ISC com solo residual de gnaiss natural e energia intermediária.



Fonte: O Autor (2018)

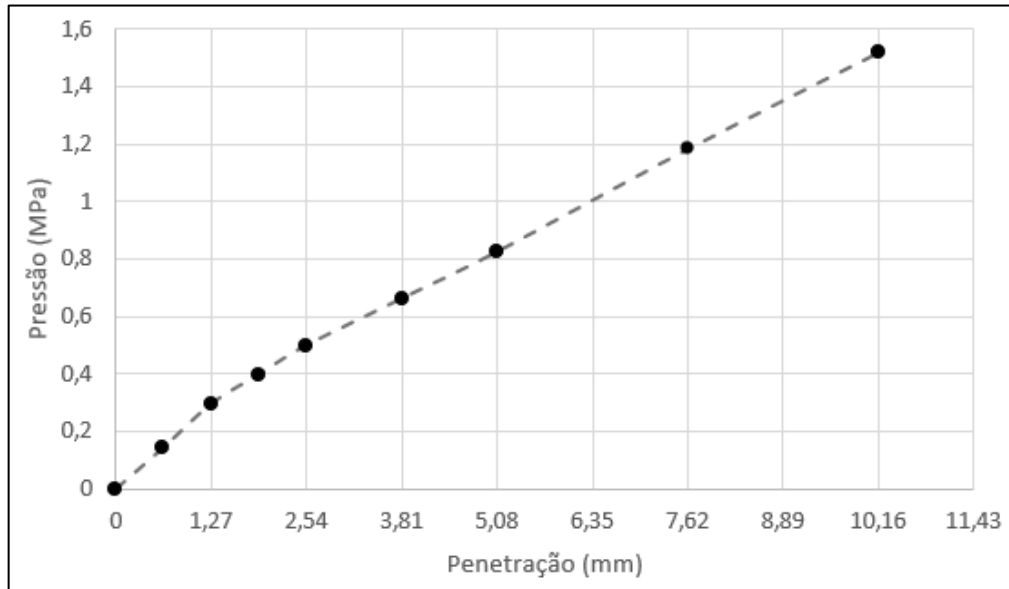
Para o solo aditivado com Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] em dosagem de 0,3 % em água, as seguintes curvas foram obtidas (Gráfico 7 e 8). Ambas foram geradas utilizando energia de compactação intermediária.

Gráfico 7 - Curva obtida durante o ensaio de ISC com solo aditivado (dosagem de 0,3 % de Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] diluído em água) e curado sem rega.



Fonte: O Autor (2018)

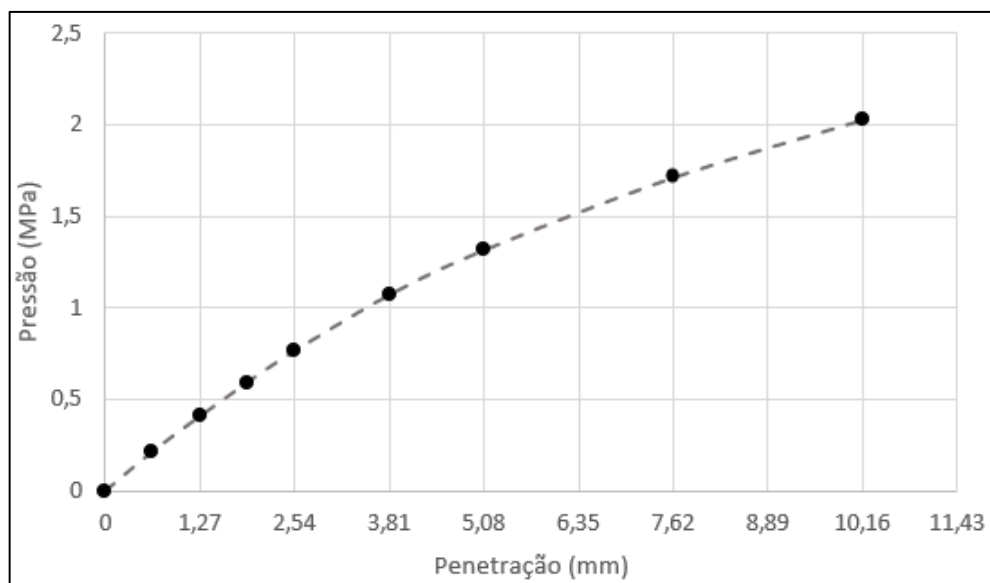
Gráfico 8 - Curva obtida durante o ensaio de ISC com solo aditivado (dosagem de 0,3 % de Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] diluído em água) e curado com rega.



Fonte: O Autor (2018)

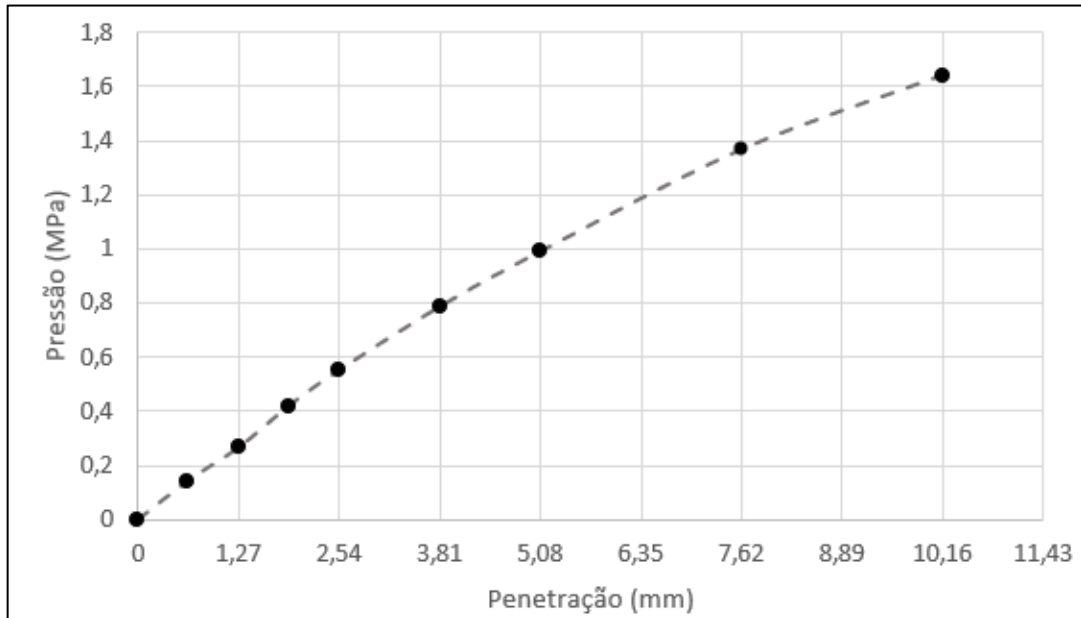
Já para o solo aditivado com dosagens de 0,45 % de Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] diluído em água, compactado com energia intermediária, foram obtidos os seguintes resultados de ISC (Gráfico 9 e 10).

Gráfico 9 - Curva obtida durante o ensaio de ISC com solo aditivado (dosagem de 0,45 % de Con-Aid[®]/CBR-Plus[®] diluído em água) e curado sem rega.



Fonte: O Autor (2018)

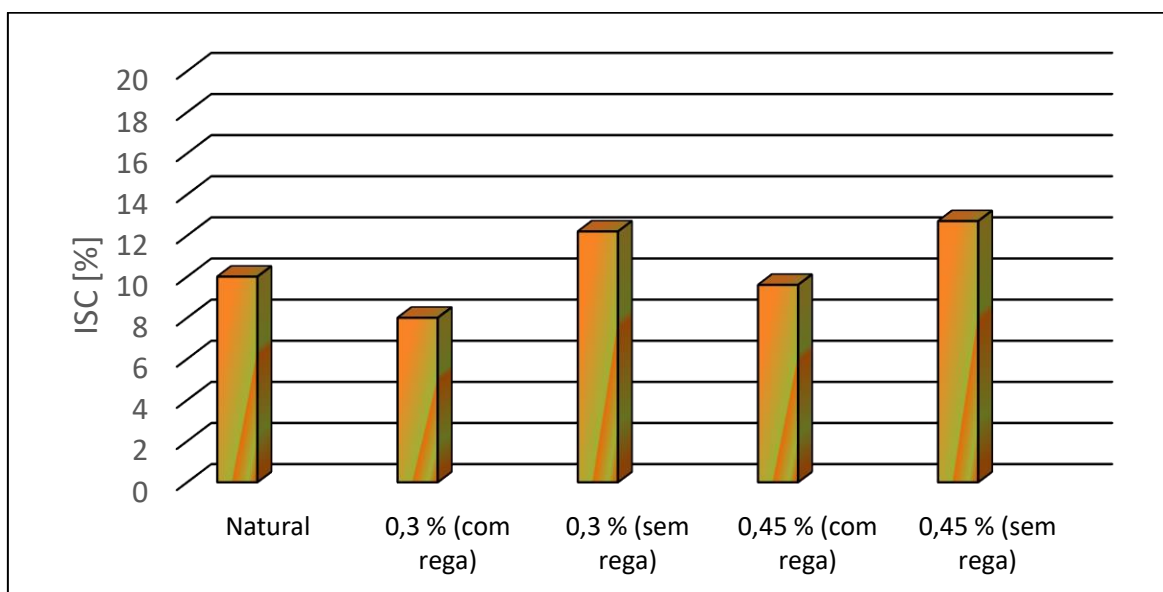
Gráfico 10 - Curva obtida durante o ensaio de ISC com solo aditivado (dosagem de 0,45 % de Con-Aid®/CBR-Plus® diluído em água) e curado com rega.



Fonte: O Autor (2018)

Através das curvas, foram obtidos os seguintes resultados de ISC para solo natural e aditivado (Gráfico 11).

Gráfico 11 - Resultados de ISC obtidos para o solo residual de gnaiss, natural e aditivado, durante o trabalho



Fonte: O Autor (2018)

Observando-os resultados de ISC, nota-se que a presença do aditivo aumentou os valores de capacidade de suporte apenas quando curado sem rega, o que não corresponde com o processo recomendado pelo fabricante. Os curados com rega obtiveram resultados de ISC menores que o atingido pelo solo residual em estado natural. O motivo disso, provavelmente foi que, ao ser compactado, o solo aditivado apresentou umidade pouco acima da ótima, decorrente do excesso de água proveniente da rega.

Os valores de ISC, para os corpos de prova com solo aditivado e curados sem rega, aumentaram a medida que a dosagem também aumentou. De acordo com os resultados, observou-se que o produto aumentou os valores de ISC em até 27 %, sendo o maior valor obtido de 12,7. De acordo com o Gráfico 1 (Tópico 2.3), que mostra a relação entre a altura de lastro e o ISC, para o valor de 12,7 % obtido a altura lastro necessária (h_L) estaria em torno de 50 cm, sendo aproximadamente 30 cm de lastro e 20 cm de sublastro.

Comparando os resultados obtidos com os recomendados para solos utilizados como subleito em obras de pavimentação rodoviária, apresentados no Tópico 2.3, observou-se os seguintes pontos:

- O solo natural apresenta valor de ISC maior que o mínimo recomendado de 4% e expansão maior que a máxima recomendada de 2%;
- O solo aditivado obteve um aumento do valor de ISC, o que se relaciona a uma maior capacidade de suporte do subleito;
- O solo aditivado obteve redução da expansão por efeitos da umidade, atingindo um valor apropriado para utilização como subleito ou reforço do subleito (menor que 1 %).

Realizando esta mesma comparação, porém agora comparando os resultados obtidos com recomendados para aplicações do solo como subleito de pavimentos ferroviários, observou-se que:

- O solo natural apresenta valor de ISC muito abaixo do recomendado mínimo de 20 %;
- O solo natural apresenta expansão maior que a máxima recomendada de 1 %;
- Embora o valor de ISC para o solo aditivado seja um pouco maior, este ainda não atingiu o valor mínimo recomendado de 20 %;
- O solo aditivado obteve redução da expansão, atingindo um valor apropriado para utilização como subleito (menor que 1 %).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados, obtidos através dos ensaios em laboratório com amostras de solo residual natural e aditivado, tem-se as seguintes conclusões:

- O solo residual de gnaiss estudado, consiste de um solo predominantemente siltoso, de graduação desuniforme (maior quantidade de partículas finas), médio índice de plasticidade e baixa capacidade de suporte. De acordo com o quadro HRB e SUCS, e com os requisitos recomendados para utilização deste material como subleito e/ou reforço de subleito em obras de pavimentação (rodoviária ou ferroviária), este solo é considerado ruim.
- Quando aditivado, o solo residual apresentou elevação do ISC (em até 27 %) apenas quando curado sem a utilização de rega, o que para fins de aplicação em campo, é economicamente satisfatório. A cura com rega é recomendada pelo fabricante do produto, para que o mesmo consiga aderir uma maior espessura da camada, porém, nos ensaios realizados em laboratório, a utilização da rega antes de compactar o solo não teve efeito satisfatório. O motivo disso pode ter sido a compactação com uma umidade um pouco acima da ótima, devido ao excesso de água proveniente da rega.
- O maior valor de ISC obtido (12,7 %) ainda é inferior ao recomendado para um solo utilizado em aplicações como subleito de ferrovias, logo, mesmo este apresentando valores de plasticidade e expansão apropriados, ele é considerado insatisfatório para camada de fundação de uma via permanente.
- Quando aditivado, o solo apresentou uma redução de expansão e índice de plasticidade, em mais de 70 e 42 % respectivamente. Embora essa melhoria seja pouca, pode-se concluir que o aditivo diminui a tendência de o solo deformar por efeito da umidade. Em um projeto de via permanente, onde a fundação precisa resistir a altas cargas provenientes do tráfego sem deformar, isso é muito importante. A medida que o solo se torna mais plástico, o mesmo tende a preencher os espaços vazios presentes no lastro, o que deixa a camada rígida e diminui a vida útil e capacidade de suporte da via.

- Considerando que o próprio fabricante do produto não recomende a utilização do aditivo para solos pertencentes ao grupo A-5 (segundo HRB), como o estudado, ainda assim este melhorou as propriedades de resistência e expansão do solo residual ensaiado. Embora essas melhorias não tenham sido suficientemente significativas para tornar o produto economicamente atrativo, quando utilizado neste tipo de solo residual (baixo teor de argila e alto teor de mica), elas mostram que o produto de certa forma gera algum resultado. Além disso, através dos ensaios realizados, espera-se que para maiores teores de argila e maiores dosagens do produto os resultados sejam mais satisfatórios e a utilização do produto se torne atrativa.

Resumidamente, pode-se então afirmar que, quando utilizado em um solo residual de gnaisse do grupo A-5 (HRB), o produto não é economicamente viável. Porém, levando em conta que o solo utilizado apresenta baixo teor de material reagente com o produto, e observando as melhorias obtidas, nota-se que o produto tende a se tornar viável em solos mais argilosos.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Durante o trabalho, notaram-se pontos que poderiam ser implementados para melhorar o estudo proposto. Recomenda-se então, as seguintes sugestões para futuras pesquisas:

- Estudar a aplicação do produto em outros tipos de solo, de preferência com elevado teor de argila;
- Testar procedimento de cura com rega, porém, no último dia deixar o solo alcançar a umidade higroscópica antes de realizar os ensaios;
- Realizar ensaio granulométrico sem o uso de defloculante;
- Realizar ensaios de compactação, para obtenção da curva de compactação, das amostras de solo aditivado após o período de cura. Como o produto teoricamente impermeabiliza as partículas de argila, a umidade ótima do solo tende a variar;
- Testar maior número de dosagens diferentes para gerar um gráfico de dosagem versus índice de suporte Califórnia, expansão e demais propriedades de caracterização;

- Adotar um meio mais eficiente de dosar o produto, evitando prováveis erros;
- Realizar ensaios sob energia modificada;
- Realizar ensaios de resistência a compressão simples (RCS) para amostras naturais e aditivadas;
- Realizar algum ensaio de desgaste superficial que consiga quantificar o desprendimento de material e formação de pó, indesejáveis para projetos de pavimentos ferroviários;
- Provar a viabilidade econômica, ou não, do aditivo matematicamente, levando em consideração preço, tempo de aplicação, recursos necessários, vida útil, manutenção e outros medidores de desempenho. Para isso, comparar os resultados obtidos com outros métodos de estabilização mundialmente utilizados.

REFERÊNCIAS

- AFRIN, H. A review on different types soil stabilization techniques. **International Journal of Transportation Engineering and Technology**. Science Publishing Group, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016. 16 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016. 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2017. 14 p.
- AZEVÊDO, A.L.C. **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das relações que acontecem no solo após a adição de cal**. 178p. Dissertação – Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.
- BRAZETTI, Rubens. Sobre o expansivo mercado de aditivos patenteados para estabilização de solos: 33^a Reunião anual de Pavimentação. **Research Gate**, Florianópolis, 16 p., jan. 2001. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/291166701>>. Acesso em: jun. 2018.
- BRINA, H. L. **Estradas de Ferro**. 19. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1988. 214 p.
- BRITO, L.C; PARANHOS, H.S. Estabilização de solos. 6. ed. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, 11 p. 2017. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/estabilizacao-de-solos> > Acesso em: abr. 2018.
- BOLINA, Cecília de Castro et al. Análise da resistência à compressão simples da mistura solo cimento para fins rodoviários. **Revista Científica Linkania Júnior**, Goiás, v. 2, n. 2, p.1-11, mar. 2012. Disponível em: <<http://linkania.org/junior/article/view/43>>. Acesso em: 30 jul. 2018.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CARVALHO, A.L. **Análise do efeito da estabilização mecânica e física em matrizes de terra.** 2011. 20 p. Relatório Final de Iniciação Científica – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011.

COIMBRA, M. V. **Modos de falha dos componentes da via permanente ferroviária e seus efeitos no meio ambiente.**2008. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **ME 093: Solos – Determinação da densidade real.** Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES -DNIT. **ES 138: Pavimentação – Reforço do subleito.** Rio de Janeiro, 2010. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES -DNIT. **ES 108: Terraplanagem – Aterros.** Rio de Janeiro, 2009. 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES -DNIT. **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentata%E7%E3o_05.12.06.pdf>. Acesso em: jun. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES -DNIT. **Projeto de superestrutura da via permanente – Lastro e sublastro.** 1. ed. Rio de Janeiro, 2015. 18 p. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/sala-de-imprensa/isf-212-projeto-de-superestrutura-da-via-permanente-lastro-e-sublastro.pdf>>. Acesso em: jun. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES -DNIT. **Terminologias rodoviárias usualmente utilizadas.** v. 1.1. Rio de Janeiro, 2007. 17 p. Disponível em: < <http://www.dnit.gov.br/download/rodovias/rodovias-federais/terminologias-rodoviaras/terminologias-rodoviaras-versao-11.1.pdf> >. Acesso em: jun. 2018.

FERNANDES, G. **Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados a geossintéticos.** 2005. 282 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia – FT, Brasília, 2005.

FERNANDES, R. **Desenvolvimento de correlação entre os ensaios de DCP e CBR estudo de caso: Pistas de testes, UFSC- Joinville.** 2015. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de engenharia de infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Joinville, 2015.

GODOI, S.C. **Caracterização geomecânica de um solo residual de gnaiss – Santo Amaro da Imperatriz, Santa Catarina.** 2014. 212 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

GOOGLE MAPS. **[Foto de satélite do local de coleta das amostras].**2018. Britagem Vogelsanger Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Britagem+Vogelsanger/@-26.279616,->

48.9451861,15z/data=!4m2!3m1!1s0x0:0xda2a15955ef9ecec?sa=X&ved=2ahUKEwixs5eM6vXdAhVNI5AKHdIBCXYIQ_BIwEXoECAgQCw>. Acesso em set. 2018.

JÚNIOR, C.R.C. **Estudo do comportamento de um solo residual de gnaise não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes**. 2006. 192 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

INDRARATNA, B; SHAHIN, M.A; RUJIKIATKAMJORN, C. Stabilisation of rail tracks and underlying soft soil formations. **Indian Geotechnical Conference**. India, 2006.

Disponível em:

<<http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1194&context=engpapers>>. Acesso em: abr. 2018.

HALL, M.R; NAJIM, K; DEHDEZI, P. K. Soil stabilization: materials, properties, and techniques. **Research Gate**, Reino Unido, p. 222-255, jun 2012. Disponível em:

<<https://www.researchgate.net/publication/259460534>> Acesso em: jun. 2018.

KAMMER, V.J; ARNS P. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de um solo estabilizado quimicamente com aditivo ConAid®/CBRPLUS® para emprego em obras de pavimentação**. Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da Universidade do Extremo Sul - UNESC. 16 p. 2013.

KIRAN, K.; MOHAN, J. A study on ground improvement techniques for pavement construction. **International Journal Of Advance Research In Science And Engineering**. Índia, p. 296-304. set. 2016.

LI, D.; SELIG, E. T. Evaluation of railway subgrade problems. **Transportation Research Board**. p. 17-25, 1995. Disponível em: < <https://trid.trb.org/view/452539>>. Acesso em: jun. 2018.

MACHADO, D.L. **Comportamento geomecânico de estruturas reliquias de um solo residual de gnaise da Ahe Simplício**. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MAGALHÃES, A. M. **Um estudo dos fatores intervenientes no desempenho de pavimentos flexíveis executados com solos residuais saprolíticos na região sul de Santa Catarina**. 2001. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization e methods and materials**: In engineering practice. 38p. Dissertação – Departamento de Engenharia Civil, Ambiental e de Recursos Naturais, Luleå University of Technology. Luleå, Sweden, 2012.

MOAYED, R. Z.; ALLAHYARI, F. Determination of Required Ion Exchange Solution for Stabilizing Clayey Soils with Various PI. **World Academy of Science: Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering**, [S.I.], v. 6, n. 1, p.32-36, 2012.

MOSELEY, M.P; KIRSCH, K. **Ground Improvement**. 2. ed. Nova Iorque: Spon Press, 2004.

NUNEZ, W.P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. 171 p. Dissertação – Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1991.

PIMENTEL, K. C. A. **Estradas não-pavimentadas e ferrovias reforçadas com geossintéticos**. 2007. 320 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RANGEL, G.W.A. et al. Modelagem computacional do pavimento ferroviário usando concreto asfáltico como alternativa para a construção da camada de sublastro. **44ª Reunião anual de Pavimentação**. Foz do Iguaçu, 2015. 15 p. Disponível em: <http://sinicesp.org.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_50.pdf>. Acesso em: jun. 2018.

ROSA, J.B; FERREIRA, C.G; GUIMARÃES, R.C. **Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação**. Artigo de Iniciação Científica – Curso de Engenharia Civil, Unidade Universitária de Ciência Exatas e Tecnológicas, 2015. Disponível em: <http://www.prp2.ueg.br/06v1/conteudo/pesquisa/inic-cien/eventos/sic2006/arquivos/engenharias/estabilizacao_solo.pdf> Acesso em: jun. 2018.

RUMO. **Parecer técnico – Modernização de via permanente**. Manual do programa de exploração ferroviária (PEF), Curitiba, 2016. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/caderno_de_engenharia__anexo_iii.pdf> Acesso em: jun. 2018.

SANTOS, M. N. **Análise do efeito da estabilização mecânica em matrizes de terra**. 2012. 30 p. Relatório Final de Iniciação Científica - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. 54p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

SAVAGE, P.F. **Con-aid technology: The treatment of natural soil**. Manual do produto. 2011.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SILVEIRA, F. G. **Investigação do comportamento mecânico de um solo residual de gnaiss da cidade de Porto Alegre, RS**. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

TEIXEIRA, I. **Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento**. 2014. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Arquitetura, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2014.

TISCOSKI, D. E; ARNS P. **Tratamento permanente em solo argiloso com aditivo Con-Aid® CBRPLUS® da rua José Bartochack localizada em Içara – SC.** Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da Universidade do Extremo Sul - UNESC. 17 p. 2016.

VENTURINI, J.A. **Aplicação da metodologia MCT para classificação de alguns solos e rochas da região de Santa Catarina.** 2015, 73f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

ZUBER, S.Z.S. et al. Review on soil stabilization techniques. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Malásia, p. 258-265, jan. 2013.