



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS



ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS PARA FINS RODOVIÁRIOS

FÁBIO DE OLIVEIRA HUSS

MANAUS

2018



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS**



FÁBIO DE OLIVEIRA HUSS

ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS PARA FINS RODOVIÁRIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Materiais

Orientadora: Prof.^a Dra. Consuelo Alves da Frota

MANAUS

2018



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS**



Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

| | |
|-------|---|
| H972e | Huss, Fábio de Oliveira Estabilização Química de Solos para fins Rodoviários / Fábio de Oliveira Huss. 2018 75 f.: il. color; 31 cm. |
| | Orientador: Consuelo Alves da Frota Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas. |
| | 1. Materiais. 2. Estabilização Química. 3. Solos. 4. Pavimentação. 5. Geotecnia. I. Frota, Consuelo Alves da II. Universidade Federal do Amazonas III. Título |

FÁBIO DE OLIVEIRA HUSS

ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS PARA FINS RODOVIÁRIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Materiais

Manaus-AM, 13 de dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Consuelo Alves da Frota, Presidente
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Marcos Marques da Silva Paula
Universidade Federal do Amazonas

Prof.^a Dra. Ana Maria Guerra Seráfico Pinheiro
Universidade Federal do Amazonas

Dedico aos meus pais, Dorival e
Lecy Huss, bem como também a
todos que contribuíram para a
conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço pela vida, por me capacitar e tornar este momento possível.

A Professora Dra. Consuelo Alves da Frota, pela competente e atenciosa orientação, pela confiança em mim depositada, também pelos valiosos ensinamentos e experiências transmitidas durante o curso, bem como por ser um exemplo de dedicação e profissionalismo na atividade de ensino e pesquisa da UFAM.

Ao Exército Brasileiro, em especial a Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN) e ao Instituto Militar de Engenharia (IME), sólidas, tradicionais e competentes escolas de formação militar, profissional e cívico-moral onde me graduei Oficial combatente em 2001 e como Engenheiro Eletricista em 2007. Obrigado por todos os ensinamentos e conhecimentos técnicos dentro da atividade militar e da carreira da engenharia que muito ajudaram na conclusão do presente curso.

Ao Centro Universitário Nilton Lins, onde graduei em Engenharia Civil em 2014, pela bagagem extra e conhecimento transmitidos na minha formação profissional, em especial ao professor e condutor Eng^o Msc Jackson Matos e ao Prof Eng^o Dr. Sanches.

Ao 2^o Grupamento de Engenharia, tradicional organização militar de Engenharia de Construção do Exército Brasileiro, por ter proporcionado apoio e oportunidade de realização deste curso, bem como aplicação de conhecimentos no Ramal do Puraquequara, nas pessoas de seu Ex-Comandante Exmo. General Viana e Comandante atual Exmo. General Melo, bem como os seguintes militares: Cel Moura Gomes, Cel Codelo, Cel Menezes, Cel Nery, Ten Cel Msc Rogério, Ten Cel Dr. Ben-Hur, Ten Cel Msc Reginaldo, Maj Msc Aredes, Maj Msc Kleber, Cap Msc Bianca e Ten Msc Pena.

Aos meus pais, Coronel Eng^o Militar Dorival Huss e Prof^a Lecy Huss, pelo amor e exemplos de dedicação e esforço aos estudos, bem como por ter proporcionado para mim e meu irmão Major Fernando Huss as melhores condições possíveis para obter crescimento acadêmico e profissional.

À minha namorada, Fran Rocha, pela ajuda, compreensão e entendimento de minha ausência em momentos de lazer durante diversos momentos de folga nos últimos dois anos.

Aos meus amigos de turma, companheiros de curso: Eng^o Msc Cláudio de Paula, Prof Eng^o Msc Alemar Torres, Eng^o Érico Drummond, Prof. Eng^o Msc Matheus Pena, Eng^o Alex, Eng^o Igor Nonato e Eng^o Darbens, pela ajuda nos momentos de dificuldade e

ausência durante o presente curso.

A Sra. Eng^a Civil Msc. Cláudia Ávila Barbosa, exemplo de cordialidade, educação, disponibilidade e conhecimento profissional em orientar e ajudar a romper os mais de 80 corpos de provas confeccionados durante a pesquisa. Também aos técnicos Marcos, Luclei e Edvan pela ajuda no desenvolvimento dos experimentos laboratoriais com o material solo.

A todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente nesta jornada, durante esses mais de dois anos do curso de Mestrado.

“Dê-me uma alavanca e um ponto de apoio e eu moverei o mundo”

Arquimedes

RESUMO

A construção de subcamadas de pavimentos com a predominância de materiais granulares é o que recomenda as normas da construção rodoviária. Entretanto, a escassez de agregados pétreos em algumas regiões, caso de Manaus (AM), torna seu uso inviável do ponto de vista econômico. Portanto, tem-se a necessidade da busca de novos materiais que possam substituí-los nessa espécie de estrutura. Para resolver esse tipo de problema, a Engenharia Civil utiliza, em especial na construção dos pavimentos, a denominada estabilização de solos. No presente trabalho, pesquisou-se a estabilização química de um solo argiloso proveniente do Ramal do Puraquequara, localizado entre Manaus e Rio Preto da Eva, com a participação individual dos aditivos químicos ECOLOPAVI®, EMC²® e TERRAZYME®, bem como da geogrelha MacGrid® NET. Caracterizaram-se o material natural e as composições de acordo com testes físicos, químicos, mineralógicos e mecânicos, para os tempos de cura de 3 (três), 7 (sete) e 28 (vinte e oito dias). Os resultados mostraram o material natural como um solo argiloso e classificado como A-4 e CL. A caracterização mineralógica, por meio da Fluorescência e Difração de Raio-X, identificou o solo natural com alto teor de óxido de alumínio (36,5%) e dióxido de silício (57,2 %). Por meio do DRX, foi possível também constatar a presença da caulinita e do quartzo. Em conformidade com os resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral, a composição, tendo a presença do ECOLOPAVI®, apontou os melhores valores relativos ao solo “in natura” e às demais formulações. Conforme os dados oriundos da Resistência à Compressão Simples, as composições com a participação dos aditivos ECOLOPAVI® e TERRAZYME® obtiveram os melhores resultados. No tocante ao ensaio da RCS, utilizando-se a geogrelha MacGrid® NET e o produto ECOLOPAVI®, observou-se o aumento considerável desse parâmetro para o tempo de cura de 3 (três) dias.

Palavras-chave: solo argiloso, estabilização química, resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples, geogrelha, MacGrid® NET, ECOLOPAVI®, EMC²® e o TERRAZYME®.

ABSTRACT

The construction of sub-layers of pavements with the predominance of granular materials is what recommends the norms of road construction. However, the scarcity of stone aggregates in some regions, in the case of Manaus (AM), makes their use unfeasible from the economic point of view. Therefore, there is a need to search for new materials that can replace the stone aggregates in this kind of structure. In order to solve this type of problem, Civil Engineering uses, in particular in the construction of pavements, the so-called soil stabilization. In the present work chemical stabilization of a clay soil from the Puraquevara branch, located between Manaus and Rio Preto da Eva, is studied with the individual participation of the chemical additives ECOLOPAVI®, EMC²® and TERRAZYME®, as well as the MacGrid geogrid ® NET. Natural material and compositions were characterized according to physical, chemical, mineralogical and mechanical tests for cure times of 3 (three), 7 (seven) and 28 (twenty-eight days). The results showed the natural material as a clay soil, classified as A-4 and CL. The mineralogical characterization, through Fluorescence and X-Ray Diffraction, identified the natural soil with high content of aluminum oxide (36.5%) and silicon dioxide (57.2%). By means of the XRD, it was also possible to verify the presence of kaolinite and quartz. In accordance with the results of Tensile Strength by Diametral Compression, the composition, with the presence of ECOLOPAVI®, indicated the best values relative to the natural soil and other formulations. According to data from Unconfined Compression Testing, the compositions with the participation of the additives ECOLOPAVI® and TERRAZYME® obtained the best results. Regarding the UCT, using the MacGrid® NET geogrid and the ECOLOPAVI® product, a considerable increase of this parameter was observed for the cure time of 3 (three) days.

Keywords: clay soil, chemical stabilization, diametral compression tensile strength, unconfined compression testing, geogrid, MacGrid® NET, ECOLOPAVI®, EMC²® and TERRAZYME®.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Apresentação do produto ECOLOPAVI® ao Exército Brasileiro em 2016. | 18 |
| Figura 2 - Ilustração de estabilização de solo..... | 23 |
| Figura 3 - Uso de cal na estabilização química de solo..... | 25 |
| Figura 4 - Amostra do reagente Sulfato de Alumínio, $Al_2(SO_4)_3$ | 26 |
| Figura 5 - Amostras de geogrelhas circulares utilizadas nos ensaios..... | 28 |
| Figura 6 - Imagem aérea do Ramal do Puraquequara e localização de Bases de Instrução do CIGS..... | 30 |
| Figura 7 - Trecho do Ramal do Puraquequara. | 30 |
| Figura 8 - Amostra em tambores do ECOLOPAVI®. | 31 |
| Figura 9 - Amostra do produto ECOLOPAVI® para testes laboratoriais..... | 33 |
| Figura 10 - Amostra do produto EMC ² ® para testes laboratoriais. | 34 |
| Figura 11 - Ilustração de atuação do EMC ² ® no solo..... | 35 |
| Figura 12 - Exemplo de um aglomerado de cupim. | 36 |
| Figura 13 - Amostra do produto TERRAZYME® para testes laboratoriais..... | 37 |
| Figura 14 - Manta MacGrid® sendo aplicada em obra de pavimentação..... | 38 |
| Figura 15 - Fluxograma dos procedimentos..... | 39 |
| Figura 16 - Espectrômetro de fluorescência de Raios X da PANalytical - Epsilon 3XL..... | 46 |
| Figura 17 - Difratorômetro de Raio X da PANalytical - Empyrean..... | 47 |
| Figura 18 - Retirada do solo da jazida no Ramal do Puraquequara. | 51 |
| Figura 19 - Amostras do Solo natural sendo preparadas para ensaio de FRX. | 52 |
| Figura 20 - Amostra do Solo natural e demais utensílios para teste de DRX. | 52 |
| Figura 21 - Difratoograma do Solo natural. | 54 |
| Figura 22 - Difratoograma do Solo natural e das Composições do solo com TerraZyme®. | 55 |
| Figura 23 - Difratoograma do Solo natural e das composições do solo com EMC ² ®. | 56 |
| Figura 24 - Difratoograma do Solo natural e das composições do solo com ECOLOPAVI®. | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 - Índice de Hinckley da composição Solo natural com ECOLOPAVI® aos 28 dias. | 57 |
| Figura 26 - Corpos de Prova das composições com ECOLOPAVI® em estufa para secagem a 60 °C..... | 59 |
| Figura 27- Corpos de prova das composições com TERRAZYME® em processo de cura. | 59 |
| Figura 28 - Corpos de prova das composições com EMC ² ® em processo de cura..... | 60 |
| Figura 29 - Rompimento de CP no ensaio de Resistência à Tração..... | 60 |
| Figura 30 - Resistência à Tração x tempo de cura. | 61 |
| Figura 31 - Rompimento de CP no ensaio de RCS. | 63 |
| Figura 32 - Resistência à Compressão Simples x tempo de cura. | 63 |
| Figura 33 - Modelo dos corpos de prova em 3 camadas e com geogrelha para o ensaio de RCS. | 65 |
| Figura 34 - Geogrelha posicionada no molde cilíndrico durante o processo de compactação.... | 65 |
| Figura 35 - Resistência à Compressão Simples com a presença da geogrelha..... | 66 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Subcamadas estabilizadas de pavimentos. | 21 |
| Tabela 2 - Propriedades da Geogrelha MacGrid® | 38 |
| Tabela 3 - Ensaios e respectivas normas técnicas. | 40 |
| Tabela 4 - Propriedades Físico-químicas dos Aditivos | 51 |
| Tabela 5 - Dados da FRX alusiva ao Solo natural. | 53 |
| Tabela 6 - Estruturas identificadas (CIF), pela FRX, no Solo natural. | 53 |
| Tabela 7 - Modelo das estruturas cristalinas referente ao Solo natural. | 54 |
| Tabela 8 - Grau de Cristalinidade pelo Índice de Hinckley. | 57 |
| Tabela 9 - Limites de Atterberg, do Solo natural e Formulações. | 58 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

2° Gpt E - 2° Grupamento de Engenharia

6° BEC - 6° Batalhão de Engenharia de Construção

AM - Amazonas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

BI - Base de Instrução

CBR - *California Bearing Ratio*

CIF - *Crystallographic Information Framework*

CIGS - Centro de Instrução de Guerra na Selva

CMA - Comando Militar da Amazônia

CP - Corpo de Prova

DER/SP - Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo

DER/PR - Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DRX - Difração de Raio-X

EMC - *Earth Materials Catalyst*

FRX - Fluorescência de Raios-X

GEOTEC - Grupo de Pesquisa em Geotecnia

ICSD - *Inorganic Crystal Structure Database*

IME - Instituto Militar de Engenharia

ISC - Índice de Suporte Califórnia

RCS - Resistência à Compressão Simples

RT - Resistência à Tração

SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos

TRB - *Transportation Research Board*

TZ - TerraZyme®

UFAM - Universidade Federal do Amazonas

UTM - *Universal Test Machine*

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 | 16 |
| 1. INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 OBJETIVOS | 17 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 17 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 17 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 17 |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 19 |
| CAPÍTULO 2 | 20 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1 PAVIMENTOS | 20 |
| 2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO | 21 |
| 2.3 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA | 24 |
| 2.4 GEOSSINTÉTICOS | 27 |
| 2.4.1 Geogrelhas | 28 |
| CAPÍTULO 3 | 29 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 29 |
| 3.1 MATERIAIS | 29 |
| 3.1.1 Coleta e preparação do solo | 29 |
| 3.1.2 Ecolopavi® - IDESA | 31 |
| 3.1.3 EMC ² ® - Base Forte | 33 |
| 3.1.4 TerraZyme® - IDESA | 36 |
| 3.1.5 Geossintético | 38 |
| 3.2 MÉTODOS | 39 |
| 3.2.1 Ensaios | 39 |
| 3.2.1.1 Granulometria, Limites de Consistência e Massa Específica dos Grãos | 40 |
| 3.2.1.2 Compactação | 40 |
| 3.2.2 Composições solo-aditivo | 41 |
| 3.2.2.1 Solo-ECOLOPAVI® | 41 |
| 3.2.2.2 Solo-EMC ² ® | 43 |
| 3.2.2.3 Solo-TERRAZYME® | 43 |
| 3.2.3 Solo-aditivo-geogrelha | 44 |
| 3.3 ANÁLISE MINERALÓGICA | 45 |
| 3.3.1 Fluorescência de Raios-X (FRX) | 45 |
| 3.3.2 Difração de Raios X (DRX) | 46 |
| 3.4 ENSAIOS MECÂNICOS | 48 |
| 3.4.1 Resistência à Tração (RT) por Compressão Diametral | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.2 Resistência à Compressão Simples (RCS) com e sem geogrelha | 49 |
| CAPÍTULO 4..... | 50 |
| 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 50 |
| 4.1 MATERIAIS | 50 |
| 4.1.1 Solo e Aditivos | 50 |
| 4.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA..... | 51 |
| 4.2.1 Solo Natural..... | 52 |
| 4.2.2 Composições solo-produtos | 54 |
| 4.3 LIMITES DE ATTERBERG | 57 |
| 4.4 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS | 58 |
| 4.5 ENSAIOS MECÂNICOS | 60 |
| 4.5.1 Resistência à Tração (RT) por Compressão Diametral | 60 |
| 4.5.2 Resistência à Compressão Simples (RCS) | 62 |
| 4.5.3 Resistência à Compressão Simples (RCS) com Ecolopavi® e Geogrelha..... | 64 |
| CAPÍTULO 5..... | 67 |
| 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 67 |
| 5.1 CONCLUSÕES..... | 67 |
| 5.2 SUGESTÕES | 68 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 70 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A presença de materiais granulares nas subcamadas de pavimentos, em especial nas bases e sub-bases, é uma prática rotineira e desejável na construção de estradas. Porém, a escassez de agregados pétreos em determinadas regiões resulta, em regra, que a aquisição desses materiais em grandes distâncias de transporte, tornam sua utilização inviável do ponto de vista econômico, caso do Estado do Amazonas, e, em especial, do Município de Manaus. Tal realidade motiva a busca por novos materiais, que adicionados aos solos naturais, resultem em alternativas para serem empregados nas subcamadas dessas estruturas.

Por outro lado, sabe-se que o solo natural possui, comumente, granulometria variável e, devido à sua abundância, tem grande emprego na Engenharia Rodoviária. Todavia, nem sempre satisfaz às especificações para sua utilização em base e/ou sub-base de pavimentos, visando atender os parâmetros mínimos exigidos pelas normas técnicas.

Nesse caso, a engenharia apresenta algumas alternativas, como:

- dimensionar os pavimentos considerando as limitações do solo,
- substituir o material existente por outro de melhor qualidade, ou
- corrigi-lo, alterando suas propriedades, e obtendo-se um novo material que atenda às necessidades do projeto e das normas vigentes — a denominada estabilização de solos.

Sublinha-se que a opção de remover o solo, e o substituir por outro com características apropriadas ao projeto, normalmente, ocasiona custo de transporte. Dessa forma, a Engenharia Civil emprega, dentre outros métodos, a mistura do solo, oriundo do local da obra, com aditivos (cal, cimento, etc), a designada estabilização química, de suma importância para a realidade da pavimentação urbana em cidades e municípios. Concede-se, assim, um material com adequadas propriedades geotécnicas. Observa-se, ainda, que tal processo se mostra como solução a preservação dos recursos naturais na construção rodoviária, especialmente em substituição ao emprego das britas, tradicionalmente usadas em camadas de pavimentos. Ressalta-se, também que, a despeito de diversos trabalhos

constantes na literatura (CRISTELO, 2001; FRANÇA, 2003; SILVA, 2007; PICANÇO, 2012; SILVA et al, 2015), pesquisas continuam sendo desenvolvidas nessa temática.

Em outra vertente, tem-se os geossintéticos, artefatos industrializados, utilizados contíguos aos solos e comercializados em diversos tipos, caso das geogrelhas que tem como primordial finalidade o reforço de solos GEOFOCO BRASIL (2018). A experimentação dessas formulações (solo + geogrelha), com indicações de ganhos significantes, são registradas na literatura, como nos trabalhos de FERREIRA (2007), KAKUDA (2011) e PEREIRA (2017).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar composições do solo natural com aditivos químicos, e, segundo a melhor resposta mecânica, investigar a influência da participação de um geossintético, visando contribuir com soluções de interesse da Engenharia Militar do Exército Brasileiro.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) caracterizar geotecnicamente o solo,
- b) realizar a dosagem do solo com aditivos (estabilização química),
- c) realizar ensaios físicos, mineralógicos e mecânicos com o solo e composições,
- d) verificar a atuação da geogrelha,
- e) contribuir com alternativas para construção na região Amazônica, sob a responsabilidade do Exército Brasileiro.

1.2 JUSTIFICATIVA

O perfil geotécnico é constituído de camadas de solo e rocha. Dependendo da região em que este se localiza, apresenta uma vasta diversidade de granulometrias, graduações, composições químicas e mineralógicas. Tais materiais são costumeiramente utilizados como matéria prima na construção de pontes, aeroportos, túneis, hidroelétricas, estradas, ferrovias, etc.

No Estado do Amazonas são encontrados em predominância solos argilosos superficiais, os quais, por via de regra, não possuem características compatíveis para o seu emprego em bases e sub-bases de pavimentos. Nesse caso, é necessário a remoção total ou parcial, substituindo-o preferencialmente por um material granular, que fornecerá a resistência solicitada em projeto.

Observa-se, porém, que os materiais pétreos, devido a sua grande procura e pouca oferta, ou mesmo a distância de transporte da jazida, inviabilizam a sua utilização. Do mesmo modo, o conhecimento das potencialidades e limitações dos materiais de uma região, possibilita a escolha de soluções economicamente mais viáveis com vista a execução das subcamadas de um pavimento. Por consequência, a Geotecnia indica, dentre outras opções, a nomeada estabilização química, isto é, a composição do solo, proveniente do entorno da construção, com aditivos.

O Exército Brasileiro, por meio de suas organizações militares de ensino e pesquisa, como o Instituto Militar de Engenharia (IME) e unidades de Engenharia de Construção na Amazônia, tal como o 2º Grupamento de Engenharia (2º GPT E), mostram-se empenhadas em atividade de estudos e da aplicação de novas tecnologias em obras da pavimentação na Região Norte. Sendo assim, diversos produtos vêm sendo disponibilizados aos engenheiros militares com a finalidade de implantar soluções técnicas e economicamente viáveis para os problemas da pavimentação rodoviária regional (Figura 1) — caso do trabalho em apreço.



Figura 1 - Apresentação do produto ECOLOPAVI® ao Exército Brasileiro em 2016.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Organizou-se o trabalho em foco da seguinte forma:

No Capítulo 1 apresenta-se a parte introdutória da Dissertação, em que é exposto os ideais que motivaram esta pesquisa. Igualmente, destaca-se a importância da estabilização química de solos na construção de pavimentos, bem como descrevem-se os objetivos e etapas do estudo em questão.

O Capítulo 2 contém o referencial teórico que embasou a pesquisa. São explanados sobre os principais tipos de pavimentos, aditivos químicos e geossintéticos empregados na Engenharia Rodoviária, evidenciando suas características e funcionalidades, além de abordar a estrutura dos pavimentos flexíveis.

No Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos da pesquisa.

O Capítulo 4 tem por objetivo a análise e discussão dos resultados obtidos.

Por último, no Capítulo 5, mostram-se as conclusões e considerações finais do estudo, assim como sugestões para continuar o trabalho.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos necessários ao desenvolvimento do trabalho em questão, de modo especial aqueles relativos aos pavimentos, geossintéticos e a estabilização de solos.

2.1 PAVIMENTOS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma NBR 7207/82, conceitua o pavimento como sendo uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada economicamente e simultaneamente em seu conjunto a: resistir e distribuir os esforços verticais e horizontais produzidos pelo tráfego, bem como melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança.

Por consequência, o pavimento é uma superestrutura formada por um revestimento e subcamadas, com espessuras definidas, as quais se encontram sobre uma superfície final de terraplenagem (fundação). Tem como finalidade suportar e distribuir os esforços solicitantes, decorrentes das condições do tráfego e do clima, bem como proporcionar aos usuários conforto, economia e segurança ao longo de sua vida útil. Ressalta-se que tais camadas são dispostas, regularmente, com resistência decrescente de acordo com o aumento da profundidade, em concordância com a redução progressiva dos esforços transmitidos.

Tal conceituação engloba uma grande variedade de estruturas para as quais, em geral, o solo se torna um dos componentes essenciais, conferindo-lhe importante papel na construção de um pavimento. Tais estruturas são classificadas, genericamente, em rígidas e flexíveis, tendo a primeira como revestimento uma placa de concreto de cimento Portland e a segunda, mais comumente utilizada no Brasil, formada por uma mistura de agregados minerais (graúdos, miúdos e fíler) e ligante betuminoso.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006), de uma forma geral, tipifica os

pavimentos em:

- flexível: as camadas apresentam deformação elástica sob o carregamento aplicado e, a carga se distribui através das camadas. Exemplo típico: pavimento com base de brita graduada tendo revestimento asfáltico.
- semirrígido: caracteriza-se por uma base estabilizada por aglutinante com propriedades cimentícias. Exemplo: base em solo cimento com revestimento asfáltico.
- rígido: revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento. Exemplo: pavimento com laje de concreto de cimento Portland na condição de revestimento.

Também em conformidade com o aludido órgão rodoviário, as bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas podem ser classificadas nos tipos designados na Tabela 1.

Tabela 1 - Subcamadas estabilizadas de pavimentos.

| Base e Sub-Bases | | |
|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Granulares | Estabilização Granulométrica | Solo Brita |
| | | Brita Graduada |
| | | Brita Corrida |
| | | Macadame Hidráulico |
| Estabilizadas (com aditivos) | Com cimento | Solo Cimento |
| | | Solo Melhorado com cimento |
| | Com Cal | Solo-Cal |
| | | Solo Melhorado com cal |
| | Com Betume | Solo-Betume |
| | | Bases Betuminosas diversas |
| | Aditivos Químicos | |

Fonte: Adaptado do Manual de Pavimentação DNIT (2006).

2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

Define-se a estabilização de solos na pavimentação como procedimentos que visam melhorar as propriedades, como: resistência, deformabilidade e permeabilidade. Assim sendo, reside em um processo que confere ao material “in natura” maior resistência às cargas. FRANÇA (2003) menciona que tal metodologia consiste em aperfeiçoar as

características e alterar as propriedades desse material para que possa resistir às situações mais adversas, seja devido a esforços e desgastes relacionados ao tráfego ou por ação de intempéries. Para tal, podem ser empregados métodos de natureza física, química ou mecânica.

O processo mecânico beneficia solos e rochas alteradas, ou seja, materiais de diferentes granulometrias, cuja união proporciona condições de estabilidade após umedecimento e compactação (SENÇO, 2001). A metodologia física se vale de técnicas como a estabilização térmica (tratamento por congelamento ou aquecimento) e a estabilização por eletro-osmose. Apesar de ser alvo de muitos estudos, o método físico tem se revelado inviável economicamente, o que restringe seu uso a casos particulares (CRISTELO, 2001). A metodologia química emprega a inserção de aditivos, sendo as partículas do solo aglutinadas por meio de reações químicas (CRISTELO, 2001). Com isso, suas propriedades físicas e mecânicas são melhoradas. Entre os produtos mais usuais tem-se o cimento Portland, materiais betuminosos, cal e uma infinidade de aditivos industrializados (FRANÇA, 2003).

Os procedimentos que visam aprimorar as propriedades geotécnicas dos solos para uso em obras de engenharia, de acordo com a estabilização, mostram-se largamente difundido. Notadamente, quando esses materiais não são apropriados em sua condição natural, para as finalidades a que se destinam. Apesar de inúmeros trabalhos que fazem parte da literatura (CRISTELO, 2001; SILVA, 2007; PIKANÇO, 2012; SILVA et al, 2015; FRANÇA, 2017), pesquisas continuam sendo desenvolvidas com essa temática. Não obstante, não foi possível ter-se uma padronização de metodologias, posto que a experiência prática também mantém reinante a filosofia de que "cada caso é caso a ser otimizado", tratando-se de processos de estabilização de solos.

O marco histórico da estabilização ocorreu durante a 2ª Guerra Mundial, quando houve a necessidade da construção de rotas militares. No contexto moderno, devido ao desenvolvimento da humanidade, teve-se como consequência uma grande aceleração do setor da construção civil, acarretando uma elevada exploração de áreas terrestres, reduzindo, então, a disponibilidade dos chamados "bons" solos. Por conseguinte, perdura em nossos dias a necessidade de investigação a fim de se encontrar alternativas viáveis que solucionem o problema da inserção desses materiais não adequados pelas normas vigentes, particularmente os solos finos (SILVA, 2007).

Enfatiza-se que, os solos de granulometria fina apresentam apreciável variação de

sua capacidade de suporte em função do teor de umidade. Mostram-se bastante sensíveis à presença de água, posto que, quando úmidos, tornam-se plásticos, deformando-se sob ação de pequenas cargas. A observação deste fato induziu os engenheiros rodoviários a estudarem técnicas que reduzissem a perda de resistência com o acréscimo da umidade. Logo, surgiram as formas de estabilização com os aglomerantes (cal e cimento).

Para Vendruscolo (2003), os métodos de estabilização de solos se classificam em três grupos: mecânica, que objetiva melhorar as características do solo por meio de uma melhor “arrumação” das suas partículas e/ou recorrendo a correções da sua composição granulométrica; física, cujas propriedades do material natural são alteradas pela ação do calor, da eletricidade, etc.; e a química, que modifica permanentemente as propriedades do solo pela ação de aditivos (cimento, cal, betume). A utilização correta dessas técnicas leva à redução nos tempos de execução da obra, viabiliza a industrialização do processo construtivo, além de proporcionar uma considerável economia para o empreendimento (Figura 2).

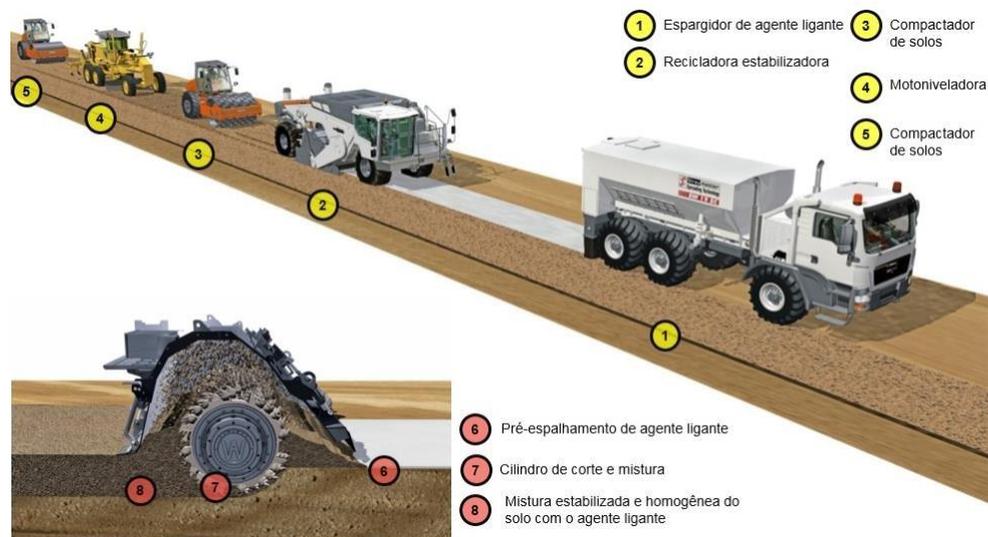


Figura 2 - Ilustração de estabilização de solo.

Fonte: <http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2013/02/distribuidor-de-cal-e-cimento.html>.
Acesso em 15 Ago 17.

Cristelo (2001), alude que as principais justificativas para a estabilização de um solo podem ser enunciadas como:

- a necessidade de desenvolvimento econômico de uma região formada de terrenos tecnicamente inadequados;

- permitir a utilização de estradas secundárias e rurais, em boas condições;
- fornecer composições para bases de pavimentos;
- atuar como material que reduz a absorção de ruídos, particularmente em zonas urbanas, relativo a outros materiais de construção;
- propiciar a circulação de tráfego em determinadas áreas e em curtos intervalos de tempo, por exemplo, em caso de emergências militares; e
- fornecer alternativa à execução de pavimentos, nomeadamente das bases, sub-bases de estradas e aeródromos.

2.3 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

A estabilização química altera as propriedades do solo pela inserção de uma pequena quantidade de aditivo. Essa adição pode ser processada via quatro mecanismos: substituição das moléculas de água e de cátions adsorvidos por cátions hidro-repelentes, estabelecimento de ligações reforçadas entre os agregados pela incorporação de ligantes e floculação (SILVA, 2007). Dentre os aditivos mais usados, tem-se o cimento Portland, a cal (Figura 3), as pozolanas, os materiais betuminosos e produtos químicos industriais.

Silva et al (2015) sublinham que o solo estabilizado quimicamente é uma mistura uniforme e homogênea, compactada em proporções de acordo com ensaios laboratoriais prévios, tendo a participação de estabilizantes líquidos ou sólidos, reagentes (objetiva acelerar as reações) e água. O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo - DER/SP, concluiu em 2006 que o resultado proveniente desse tipo de metodologia apresenta, usualmente, maior estabilidade e durabilidade frente ao solo natural, podendo ser empregado como reforço de subleito, em sub-base ou base de um pavimento.



Figura 3 - Uso de cal na estabilização química de solo.
Fonte: <http://www.minascal.com.br>. Acesso em 15 Ago 17.

Cita-se como vantagens e fatores positivos para a aplicação desse tipo de estabilização (ECOLOPAVI®, 2017):

- os custos, normalmente, mostram-se reduzidos, mesmo no caso de jazidas grandes distâncias;
- facilidade e rapidez na execução de obras de terra, além da redução com despesas de transporte pelo uso de material do próprio local da obra;
- o solo pode ser remanejado em qualquer tempo, porquanto não perde suas características adquiridas;
- os equipamentos usados são os mesmos utilizados para os habituais trabalhos de terraplenagem ou para conservação de estradas, como: motoniveladoras, grades-de-discos, caminhões-pipa, tratores agrícolas, e rolos pé-de-carneiro;
- o custo de conservação é mínimo;
- os solos adquirem grande trabalhabilidade, tornando-se facilmente compactáveis;
- verificam-se redução da absorção de água, ascensão capilar, poder de sucção e expansibilidade;
- a presença de produtos químicos minimiza a agressão ao meio ambiente, por tornar desnecessária a exploração de jazidas de materiais naturais (estabilização granulométrica);
- aumenta a vida útil das camadas de um pavimento, sejam elas revestidas ou não, logo proporciona melhoria e conforto ao tráfego porque inibe o aparecimento

de defeitos (patologias);

- garante uma maior proteção das camadas aos fatores climáticos, como geada e umidade excessiva;
- rapidez na execução, ou seja, da ordem de 1.600 a 2.000 m² de produção por dia.

Destaca-se que, a utilização de um reagente, tal quanto a dosagem do estabilizante, depende, dentre outros fatores: do tipo de solo, custo do material, e condições específicas do dimensionamento. Exemplificam-se como tais materiais (ECOLOPAVI®, 2017):

- sulfato de alumínio (Figura 4), sendo em um sal químico metálico, solúvel em água. Atua como um acelerador da reação entre os componentes do aditivo químico hidrofobante e do solo. Forma-se, conseqüentemente, um composto metalo-orgânico insolúvel, permanente e impermeável. Recomendado para tratamento de solos não plásticos, de predominâncias arenosas e/ou argilo-arenosas, dos tipos A 2-4, A 2-5 e A 2-6, podendo ser igualmente ser aplicado em amostras A-4 ou A-6, ou em outros tipos de materiais naturais, desde que os resultados dos ensaios laboratoriais atendam as especificações técnicas requeridas pelo projeto.

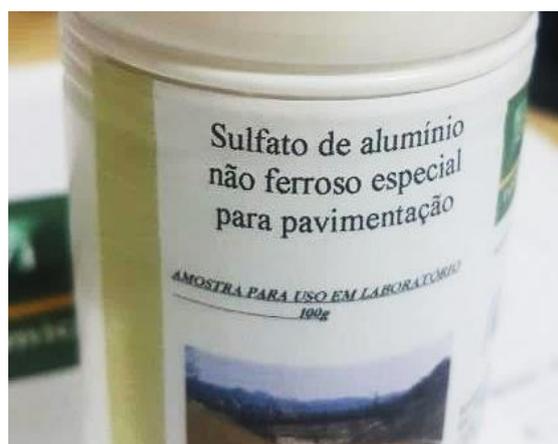


Figura 4 - Amostra do reagente Sulfato de Alumínio, $Al_2(SO_4)_3$.

- cal, um material resultante da calcinação de rochas carbonatadas (calcário dolomito ou magnesiano), em altas temperaturas, e posterior pulverização. Possuem considerável variação em suas propriedades químicas e físicas. Desta forma, essas diferenças podem se refletir substancialmente no comportamento

desse material, quando participante da mistura com o solo. Os tipos de cales comerciais mais empregadas na Engenharia Rodoviária são as hidratadas, tendo em vista a facilidade de aplicação na obra e sua disponibilidade. Em quantidade correta, e com teor compatível de óxido de cálcio ativo, suscita, principalmente, nos solos plásticos (predominantemente argilosos e/ou siltosos) diversas reações. As principais, são: troca iônica, ação pozolânica e carbonatação, as quais, conjuntamente, promovem profundas modificações nas características estruturais dos solos, notadamente, nos seguintes aspectos: redução na plasticidade, diminuição da fração argila, redução na expansão e contração, secagem aparente das argilas muito úmidas, aumento da capacidade de suporte, redução da massa específica aparente seca máxima e do teor da umidade ótima, e aumento do pH.

- outros reagentes são encontrados na literatura, como o tradicional cimento Portland, usados na construção civil, em obras hidráulicas, ferroviárias e geotécnicas.

2.4 GEOSSINTÉTICOS

Os denominados geossintéticos constituem-se em produtos industrializados, com pelo menos um de seus componentes fabricado com polímero sintético ou natural. Apresentam-se na forma de manta, tira, ou estrutura tridimensional, e são utilizados em contato com o solo ou com outros materiais em aplicações na engenharia civil, geotécnica e ambiental (IGS, 2018).

Os geossintéticos podem apresentar diversas funções, entre as quais se destacam separação, filtração, drenagem, reforço, contenção de fluidos/gases, ou controle de processos erosivos. O desenvolvimento dessa tecnologia possibilitou a simplificação de vários problemas e sistemas de engenharia, tais como: construções sobre solos moles, ganho de estabilidade de taludes, drenagem de vias, mitigação da erosão, entre outros (CIVILIZAÇÃO ENGENHEIRA, 2016). Tem-se como principais tipos de geossintéticos: geotêxteis, geogrelhas, georedes, geomembranas, geocompositos, geotubos, e os geoexpandidos.

2.4.1 Geogrelhas

As geogrelhas, como geossintéticos com forma de grelha, possuem como principal aplicação o reforço de solos. Em concordância com o site Geofoco Brasil (2018), são formadas por elementos resistentes à tração e integralmente conectados com a finalidade de trazer resistência ao solo. Tais materiais são vazados, de modo que a malha com aberturas (Figura 5) permita uma maior interação e ancoragem no meio inserido, pois proporcionam uma comunicação com o solo aterrado. São indicados para atender às mais diversas aplicações em obras de engenharia, como por exemplo: aterros, contenções, pavimentos, bases, sub-bases e taludes íngremes. A interação entre o material natural e a geogrelha depende basicamente das propriedades mecânicas do solo (densidade, granulometria, composição) e das características desse geossintético, sendo ainda função dos mecanismos de cisalhamento na interface do solo confinado nos orifícios da malha (GEOFOCO BRASIL, 2018).

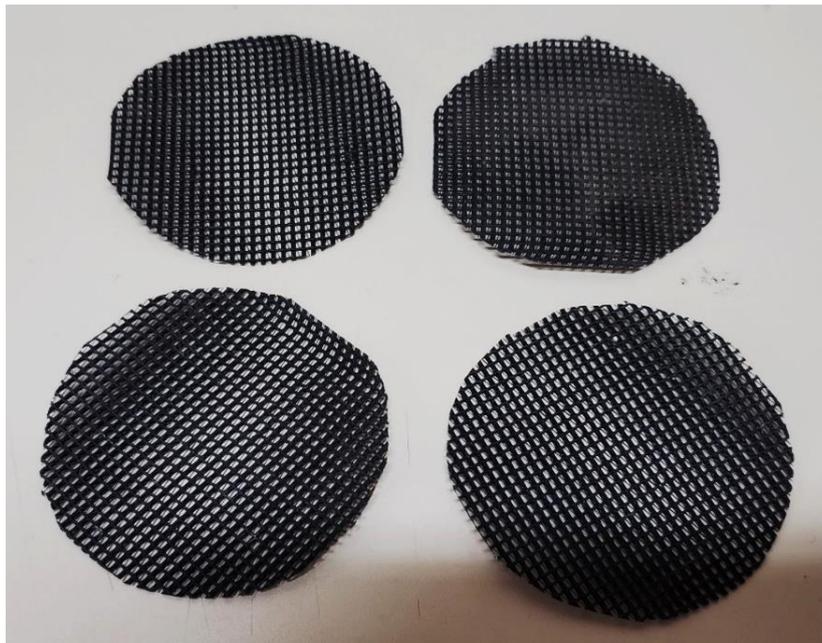


Figura 5 - Amostras de geogrelhas circulares utilizadas nos ensaios.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta detalhes da obtenção das amostras, os métodos de ensaio e as principais características dos materiais empregados no estudo experimental.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Coleta e preparação do solo

Manaus, local da coleta do material natural, situa-se na porção nordeste do Estado do Amazonas e possui uma área de aproximadamente 11.458,50 km². O citado município faz parte da bacia amazônica e posiciona-se na margem esquerda da confluência dos rios Negro e Solimões, formadores do Rio Amazonas. Se distingue pela sua malha hidroviária formada por rios e igarapés. Possui aspectos climáticos característicos de regiões tropicais, podendo ser classificada como quente e úmida, tendo duas estações, cuja uma delas se assinala pelo elevado índice pluviométrico, com média anual variando de 2100 a 2500 mm. A temperatura média varia de 24 a 36°C, podendo chegar a 40 °C. A umidade relativa do ar é bastante elevada, indicando nos meses mais chuvosos valores da ordem de 80 a 90 % e nas épocas de estiagem podendo chegar, no mínimo, a 75 % (LIMA, 1999; PIKANÇO, 2012).

O solo, participante desse trabalho, provém da formação geológica Alter do Chão, composta por predominância de material superficial não consolidado, em regra, argiloso, com baixa capacidade de suporte. O Ramal do Puraquequara, local específico da extração do solo “in natura”, designada Rodovia AM-449, compreende cerca de 55 km. Constituiu-se em uma estrada vicinal de uso restrito militar, com o propósito de interligar as Bases de Instrução (BI) do Centro de Instrução de Guerra na Selva (CIGS) ao km 53 da Rodovia Estadual AM-010 (Figura 6).



Figura 6 - Imagem aérea do Ramal do Puraquequara e localização de Bases de Instrução do CIGS.
Fonte: Google Earth. Acesso em: 16/08/2017.

Sublinha-se que as “vicinais”, são, normalmente, estradas municipais, pavimentadas ou não, de uma só pista, e de padrão técnico condizente com baixo volume de tráfego. Nota-se, igualmente, que as vicinais pavimentadas são denominadas rodovias vicinais e as não pavimentadas estradas vicinais. Especialmente, no Ramal do Puraquequara (Figura 7), a frequência de veículos diária é baixa, com carga de eixo dos principais veículos do tipo *Standard Army Truck* (100kN), tendo tráfego, em geral, 2 (duas) vezes por dia. Usada hegemonicamente pelo Exército Brasileiro. Observa-se que, não há expectativa de crescimento considerável desse tráfego pelos próximos 5 (cinco) anos.



Figura 7 - Trecho do Ramal do Puraquequara.

3.1.2 Ecolopavi® - IDESA

Produzido no Estado de São Paulo, o ECOLOPAVI® é distribuído no Brasil e exterior pela IDESA Amazônia. O produto tem por objetivo proporcionar impermeabilidade e elevar a capacidade de suporte do solo não condizente com as prescrições de norma, permitindo sua aplicação em obras de pavimentação urbana e rodoviária.

Define-se o mencionado estabilizante como um sal de origem orgânica, líquido, totalmente solúvel em água, que atua como um catalisador (Figura 8). Promove e facilita a troca iônica. Por conseguinte, acarreta maior coesão das partículas finas dos solos, impermeabilizando-as. Sua forte ação aglutinante é devida ao fenômeno da troca de base, que elimina o campo eletromagnético que se forma no entorno dos grãos, ionizando as moléculas da água, fazendo-as aderirem fortemente à superfície das partículas. A empresa fornecedora alude que os solos estabilizados com esse produto adquirem trabalhabilidade, tornando melhor e mais eficaz a compactação. Também citam a redução na absorção de água, ascensão capilar, poder de sucção e expansibilidade, além do aumento de suporte (ECOLOPAVI®, 2017).



Figura 8 - Amostra em tambores do ECOLOPAVI®.

Fonte: <http://www.ixengineercommand.com/showphoto.php?photoID=13>. Acesso em: 16/08/2017.

Milton Vargas (1977), em seu livro *Introdução à Mecânica dos Solos*, aponta: “Nas argilas, a água intersticial estará sujeita à força atrativa das partículas, a qual decai rapidamente com a distância à superfície do grão. Portanto, a água intersticial estaria sujeita a pressões de intensidades variáveis. Em primeiro lugar, numa distância da ordem de grandeza de algumas moléculas, a pressão atrativa é da ordem de grandeza de milhares

de atmosferas. Ora, os trabalhos de Bridgman, sobre o estado da água sob pressões elevadíssimas, mostraram que, nessas condições, a água é sólida, mesmo na temperatura ambiente de 15°C a 25°C. É a camada de água solidificada dos solos. Nos pontos de contato dos grãos, os filmes de água solidificada interpenetram-se, estabelecendo um vínculo rígido entre os grãos, e emprestando-lhe coesão verdadeira. Igualmente contribui para este tipo de coesão, embora menos intensamente, uma segunda camada de água sujeita a pressões, de ordem capilar, até de dezenas de atmosferas. Suas propriedades são as de líquido viscoso preso aos grãos. Caracteriza-se como uma camada de água adsorvida, atraída por forças moleculares suficientemente elevadas para imobilizá-la. Finalmente, o restante da água é livre de se mover pela ação da gravidade nos canalículos do solo”.

As citadas forças moleculares atrativas decorrem da interação entre o campo eletromagnético, que se forma à superfície das partículas coloidais, e as moléculas de água ionizadas pela ação deste campo. Por outro lado, a neutralização das cargas eletromagnéticas, pela troca de cátions estável e permanente, impede o desenvolvimento da camada de água adsorvida, que causa o afastamento entre as superfícies das partículas. Desta maneira, no solo tratado é reduzido ao mínimo sua absorção, tornando-se impermeável, e, conseqüentemente, estabilizado (ECOLOPAVI®, 2017).

Cita, ainda, a empresa Ecolopavi® que as bases construídas com tal tecnologia, tendo espessuras entre 10 a 20 cm, permanecem secas durante os períodos chuvosos. Mostram-se impermeáveis, com elevada resistência (CBR), e podem ser aplicadas sobre elas revestimentos, preferencialmente, do tipo Pré-Misturado a Frio (PMF), com espessuras de 1 a 3 cm.



Figura 9 - Amostra do produto ECOLOPAVI® para testes laboratoriais.

Na aplicação com esse aditivo (Figura 9), consoante ao fabricante Ecolopavi® (2017), devem ser levados em consideração:

- Solos areno-argilosos devem ser misturados na proporção de 1:1.000 em peso, juntamente com o neutralizante sulfato de alumínio (1:5.000 em peso). Sua fração areia garante resistência devida ao atrito intergranular e a argila impermeabilidade, além de acrescentar coesão, alcançando altos valores de CBR. Essas dosagens deverão ser otimizadas em laboratório.
- Solos finos do tipo argilo-arenosos ou argilo-siltosos, com pouco ou nenhum atrito intergranular, necessitam da adição de aglomerantes (1% a 3% em peso) do tipo cal hidratada ou cimento Portland, para que atinjam maiores valores de CBR, além do ECOLOPAVI® (1:1.500 em peso). O acréscimo da resistência é, neste caso, diretamente proporcional ao aumento da dosagem do aglomerante. Ressalta-se que os solos se apresentam extremamente variáveis na natureza. Logo, torna-se necessário pesquisar em laboratório as dosagens pertinentes para a sua estabilização, igualmente levar-se em conta os aspectos econômicos.

3.1.3 EMC²® - Base Forte

EMC é a sigla em inglês de *Earth Materials Catalyst*, ou seja, Catalisador de Materiais Terrosos em português. SQUARED, por sua vez, quer dizer "ao quadrado",

significando aqui, catalizador muito mais eficaz. Consiste em um produto de origem americana, certificado pelo seu fabricante *Soil Stabilization Products TM Co.* da Califórnia (www.sspco.org). Distribuído no Brasil pela representante BASEFORTE - Pavimentação Econômica, sediada em Curitiba-PR (Figura 10).



Figura 10 - Amostra do produto EMC²® para testes laboratoriais.

A BASEFORTE (2017) cita que em sua constituição fazem parte enzimas naturais de alta qualidade, obtidas por processos de fermentação. Tais materiais enzimáticos aceleram ou catalisam reações químicas, realizando em poucos segundos, que sem a presença desse produto demorariam muito tempo para ocorrer. Catalizador biológico superconcentrado, cuja formulação serve para aumentar a densidade, cimentação, resistência à umidade e estabilidade de materiais terrosos. De acordo com o fabricante, a mencionada bioenzima promove mecanismos de adsorção, troca iônica, ligações covalentes e micro-encapsulação das partículas do solo, levando a uma maior coesão e intertravamento do material compactado. O produto também é conhecido como biocatalizador de partículas de solos (BASEFORTE, 2017).

As enzimas de EMC²® foram concebidas para atuarem como agentes de liberação de compostos, os quais visam promover a cimentação e impermeabilização de partículas de solos, em substituição aos produtos convencionais, tais como cal e cimento. Quando adicionadas a água e ao solo, essas enzimas catalisam reações químicas que geram

produtos químicos, e se entrosam nas partículas minerais, "emaranhado e soldando" todos os componentes da massa terrosa (Figura 11). Ações secundárias envolvem a lubrificação das partículas e a diminuição da tensão superficial da água, permitindo obter-se maiores densidades na compactação e resistências aos carregamentos (BASEFORTE, 2017).

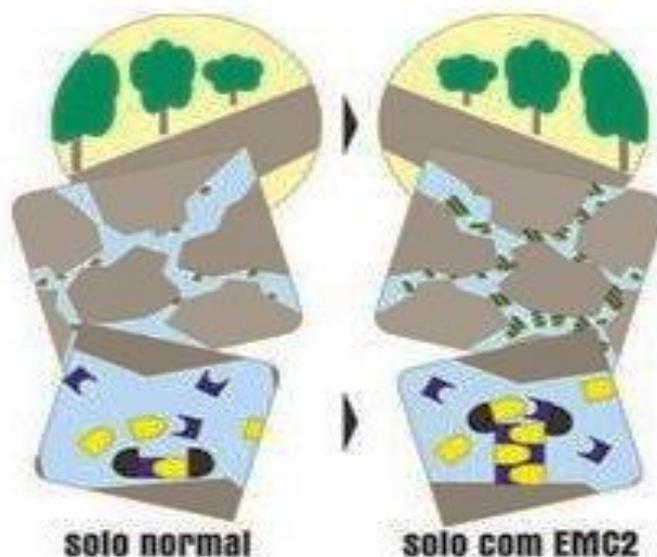


Figura 11 - Ilustração de atuação do EMC2® no solo

Fonte: <http://www.ixengineercommand.com/showphoto.php?photoID=13>.

Acesso em: 16/08/2017.

O processo com o EMC2® envolve uma série de metabolismos bioquímicos, que ocasionam a geração de substâncias apropriadas para a microencapsulação das partículas minerais do solo, unindo-as entre si. É semelhante ao efetuado pelas enzimas contidas na saliva dos cupins, que "endurecem" o solo, para formar suas moradias, os famosos "aglomerados de cupins" (BASEFORTE, 2017) (Figura 12).

Consoante ao descrito pela representante BASEFORTE (2017), o nomeado aditivo tem por objetivo melhorar as propriedades dos solos, porque torna-os estáveis perante a ação deletéria da água. Após a aplicação do produto, a camada de solo compactada tende a oferecer melhores condições em termos de capacidade de suporte (CBR) para resistir a cargas oriundas do tráfego de veículos, estando apta a participar em uma estrutura de um pavimento estável e resistente.



Figura 12 - Exemplo de um aglomerado de cupim.

Fonte: http://www.jardimdasideias.com.br/1226-dicas_para_eliminar_cupim_de_gramado.
Acesso em: 13/06/18.

Os benefícios das ações do EMC²® se aplicam em obra de terra, principalmente da área rodoviária, que envolvem grandes volumes, como enumera Baseforte (2017):

- em estradas não-pavimentadas, reduz a infiltração de umidade, a susceptibilidade ao aparecimento de buracos, ao afundamento nas trilhas de rodas, a corrugações, a perda de material por abrasão e a poeira;
- viabiliza materiais terrosos a atuarem como base, sub-base, reforço do subleito e mesmo como camada de rolamento; e
- deve ser usado quando se deseja aumentar a estabilidade e a capacidade de suporte de estruturas viárias, além de proporcionar a adoção de planos de pavimentação em etapas.

De tal modo, o aludido produto apresenta similarmente como vantagem a não necessidade em importar solo, ou seja, utilizar jazidas existentes ao longo do próprio local da construção, economizando substancialmente no transporte de materiais e no processo construtivo (BASEFORTE, 2017).

3.1.4 TerraZyme® - IDESA

A Nature Plus Inc. é uma empresa de biotecnologia, com sua fábrica em Stratford - USA, líder mundial no desenvolvimento e aplicação da tecnologia com enzimas, a partir de processos ecologicamente corretos. O TerraZyme® é comercializado no país pela

Brazzyme do Brasil Ltda®, com sede em São Paulo / SP, sendo usado em vários países na construção e manutenção de estradas, com resultados comprovados (BRAZZYME, 2017). O estabilizante em questão, segundo o seu distribuidor, tem a capacidade de alterar a matriz do solo. Dessa maneira, depois da compactação, o material natural perde a capacidade de reabsorção de água, sem eliminar os benefícios mecânicos da densificação. Pode ser aplicado como: sub-base na pavimentação com asfalto, estradas de terra, áreas de mineração e agrícolas, estradas vicinais, áreas de controle à erosão, ruas, rodovias, pátios de estacionamento, campos de aviação, áreas de proteção ecológica, parques, trilhas, caminhos e vedação de buracos em estradas de terra.

O indicado aditivo (Figura 13) é formado por extrato fermentado de melaço de cana, sulfatantes não iônicos, potássio como clorido, alumínio como sulfato e cálcio como clorido, e que possui a finalidade de melhorar a trabalhabilidade e as características do solo. O fabricante menciona, igualmente, que o produto é capaz de beneficiar os materiais orgânicos alterando suas propriedades físicas e químicas. Registra, ainda, que o aditivo não é um ligante, atua, particularmente, no componente argiloso, mas pode ser usado em materiais granulares. O efeito sobre o material argiloso não se dissolve com a chuva, concebendo uma estabilização duradoura por muitos anos. A combinação de enzimas, eletrólitos e agentes tenso ativos, age liberando água do solo e alterando a atração eletroquímica entre as partículas, mostrando acréscimo significativo na densidade, reduzindo a porosidade, que ocasionará aumento no Índice de Suporte Califórnia e, por conseguinte, ampliação da vida útil do pavimento (BRAZZYME, 2017).



Figura 13 - Amostra do produto TERRAZYME® para testes laboratoriais.

3.1.5 Geossintético

No trabalho em foco participou o geossintético, geogrelha MacGrid® NET (Tabela 2), doado pela empresa Maccaferri® Latin America na forma de uma manta com comprimento de 50 metros, peso líquido e bruto de 21,00 kg e 22,4 kg, respectivamente. Comumente conhecido como microgrelha, sendo especialmente desenvolvida para obras de base e sub-base de pavimentos, pois sua principal função é a separação entre as camadas de solo, garantindo a integridade da estrutura e proporcionando significativo aporte de resistência ao subleito, conseqüentemente, prolongando a vida útil do pavimento. São materiais extremamente versáteis e por isso podem ser utilizados também em outras áreas do conhecimento (MACCAFERRI, 2018). A Figura 14 mostra uma visão em campo da aplicação desse geossintético.

Tabela 2 - Propriedades da Geogrelha MacGrid®

| Propriedade mecânica | | | |
|--|------------------|-------------|------|
| Resistência longitudinal à tração última | kN/m | ASTM D 6637 | 45.0 |
| Resistência transversal à tração última | kN/m | ASTM D6637 | 45.0 |
| Alongamento na resistência à tração última | % | ASTM D 6637 | 35.0 |
| Resistência ao puncionamento CBR | kN | ASTM D 6241 | 3.40 |
| Resistência ao rasgo trapezoidal | kN | ASTM D 4533 | 1.70 |
| Propriedade físicas | | | |
| Gramatura | g/m ² | ASTM D 5261 | 200 |
| Espessura | mm | ASTM D 6525 | 0.50 |
| Propriedade hidráulicas | | | |
| Permissividade | s | ASTM D 4491 | 0.70 |
| Permeabilidade | cm/s | ASTM D 4491 | 0.04 |

Fonte: Catálogo Maccaferri® (2017).



Figura 14 - Manta MacGrid® sendo aplicada em obra de pavimentação.

Fonte: <https://www.maccaferri.com/br/produtos/geogrelhas-macgrid/macgrid-net/>. Acesso em: 13/11/18.

3.2 MÉTODOS

Os experimentos realizados foram executados nos Laboratórios de Solos do 6º Batalhão de Engenharia de Construção (6º BEC), da Aeronáutica (ALA/8), e do Grupo de Geotecnia (GEOTEC) da Universidade Federal do Amazonas, bem como no Laboratório de Materiais do Departamento de Física da UFAM. O conjunto da investigação experimental detalha-se no fluxograma da Figura 15.

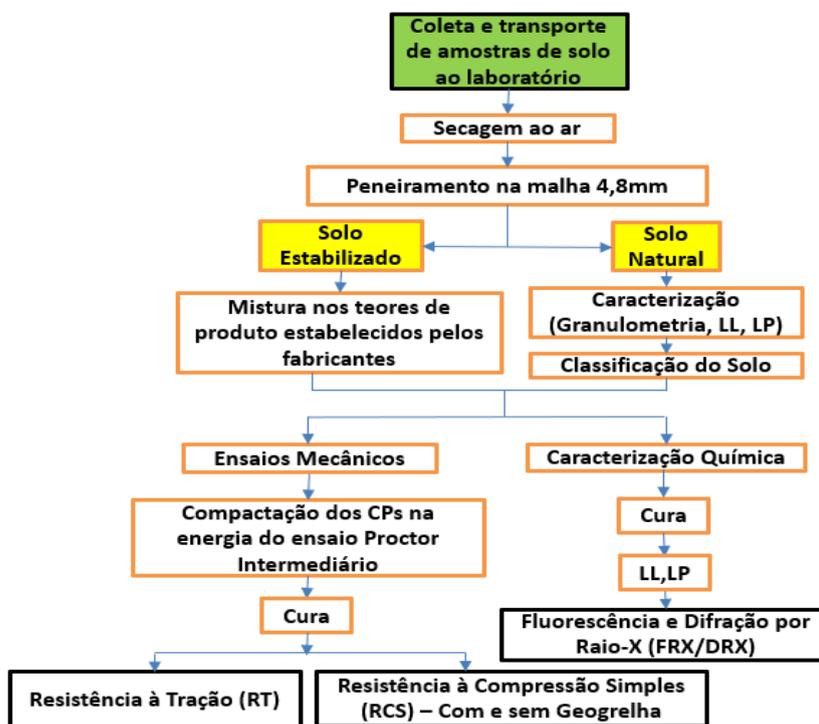


Figura 15 - Fluxograma dos procedimentos.

3.2.1 Ensaios.

Analisou-se o material natural pelas seguintes atividades, previstas em normas técnicas da ABNT (Tabela 3):

- preparação das amostras, conforme recomendações da norma NBR 6457:2016, intitulada “Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização”;
- realização dos ensaios de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos grãos, compactação, e mecânicos.

Tabela 3 - Ensaio e respectivas normas técnicas.

| Ensaio | | Norma ABNT |
|--|-----------------------------|----------------|
| Caracterização | Granulometria | NBR 7181/2016 |
| | Limite de Liquidez (LL) | NBR 6459/2016 |
| | Limite de Plasticidade (LP) | NBR 7180/2016 |
| | Massa Específica dos Grãos | NBR 6458/2016 |
| Compactação | | NBR 7182/2016 |
| Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) | | NBR 7222/2010 |
| Resistência à Compressão Simples (RCS) | | NBR 12770/1992 |

3.2.1.1 *Granulometria, Limites de Consistência e Massa Específica dos Grãos.*

O ensaio de granulometria tem como finalidade encontrar a distribuição textural do solo, em outras palavras, a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa seca total. Isto posto, executou-se o experimento acompanhando a norma em vigor NBR 7181 (ABNT, 2016). De acordo com os resultados obtidos, constrói-se a curva de distribuição granulométrica.

A finalidade dos limites de consistência, ou limites de Atterberg, é caracterizar a fração fina do solo quanto ao seu comportamento em relação à plasticidade, sendo expresso pelo Índice de Plasticidade (IP). Empregou-se nessas determinações as normas NBR 6459 (ABNT, 2016), NBR 7180 (ABNT, 2016) e NBR 6457 (ABNT, 2016).

Em um solo, só parte do seu volume total é composta pelas partículas sólidas, o remanescente é formado por poros preenchidos por uma mistura de ar e água, sendo considerado um sistema trifásico, ou seja, possuindo as fases sólida (minerais), líquida (água) e gasosa (ar) (REINERT; REICHERT, 2006). A massa (ou peso) específica dos grãos é a relação entre a massa e o volume dos sólidos. Tal parâmetro mostra-se como um dado necessário para a determinação de outros índices físicos (índice de vazios, grau de saturação, massa específica aparente seca, etc.) e da granulometria por sedimentação. O teste seguiu a norma NBR 6458 (ABNT, 2016).

3.2.1.2 *Compactação.*

A compactação de um solo visa aumentar a sua densidade, seja por meio da aplicação de um processo estático ou dinâmico. Diminui o seu volume devido a uma redução do volume de vazios, e, resulta em um solo com maior resistência ao cisalhamento, menor permeabilidade e compressibilidade. Obtém-se, pela realização de

ensaio específico, a curva de compactação, que mostra a variação da massa específica aparente seca (ou peso específico aparente seco) em função do teor de umidade, para uma dada energia de compactação. Determina-se, por conseguinte, o teor de umidade ótima versus massa específica aparente seca máxima (ou peso específico aparente seco máximo). No presente trabalho o citado experimento seguiu as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 2016), com as amostras naturais e composições solo-aditivo.

3.2.2 Composições solo-aditivo.

O método tradicional de dimensionamento de pavimentos baseia-se na seleção de materiais fundamentado no denominado Índice Suporte Califórnia (ISC). Tal parâmetro, como avaliador do comportamento mecânico, é sugerido por todas as metodologias envolvendo a experimentação dos aditivos empregados nos testes laboratoriais desse estudo. Porém, nessa pesquisa, executou-se um procedimento alternativo, analisou-se o comportamento mecânico por meio da Resistência à Tração (RT) por Compressão Diametral (NBR 7222, ABNT 2010) e Resistência à Compressão Simples (NBR 12770, ABNT 1992) com o solo natural e composições, tendo a inserção dos aditivos químicos e a presença da geogrelha.

Nos próximos itens detalhar-se-ão as metodologias adotadas no preparo das soluções, mistura e homogeneização dos aditivos com o solo. Assim como, serão delineadas a compactação, seguindo a energia do Proctor Intermediário (NBR-7182), confecção e o rompimento dos corpos de prova. No trabalho em pauta trabalhou-se com a cura em conformidade com os tempos de 3, 7 e 28 dias. Confeccionaram-se ao todo 18 (dezoito) corpos de provas para cada produto participante e amostras do solo natural, respectivamente, totalizando 72 (setenta e dois).

3.2.2.1 Solo-ECOLOPAVI®.

Para o estabilizante químico ECOLOPAVI® e no caso dos solos argilo-siltosos, mais finos, com pouco ou nenhum atrito intergranular, necessita-se a adição de aglomerantes do tipo cal hidratada, na proporção de 1% a 3% em peso, além da inserção de aditivo na fração 1:1.500 em peso. Realizaram-se os seguintes procedimentos para confecção e compactação dos corpos de prova:

a) Preparo da solução do ECOLOPAVI® a 5% em peso

1 - Pesou-se numa balança, sensibilidade de 0,01g, a quantidade de 50g de ECOLOPAVI® em uma proveta de 1.000 ml;

2 - Adicionou-se água limpa, agitando levemente para a completa homogeneização, até a marca de 1.000 ml.

b) Cálculo das quantidades e moldagem dos corpos de prova

1 - O volume da solução de ECOLOPAVI® a 5%, adicionado à amostra, calculou-se pela equação 1.

$$V_{sol(5\%)} = 20 \frac{M_s}{D} \text{ (ml)} \quad (1)$$

sendo:

M_s - massa de solo seco

D - dosagem 1:1.500 em relação ao peso seco da amostra.

2 - Inseriu-se a solução em uma proveta graduada;

3 - Calculou-se a quantidade de água a acrescentar à amostra para obtenção da umidade ótima de moldagem;

4 - Adicionou-se água à proveta com a solução de ECOLOPAVI® até alcançar o volume determinado no subitem 3.

c) Aglomerante cal hidratada seca.

Usou-se o valor de 2%, cuja quantidade determinou-se como segue:

$$M_{chs} = M_s \cdot D \text{ (g)} \quad (2)$$

sendo:

M_s - massa do solo seco

D - dosagem em percentual.

d) Moldagem do corpo de prova

Adicionou-se à amostra, preparada seguindo a NBR-6457, a quantidade de aglomerante acompanhando o item b, homogeneizou-se, acrescentou-se a solução de ECOLOPAVI® com a água necessária para obtenção da umidade ótima, novamente uniformizou-se, e procedeu-se à moldagem.

e) Secagem e cura

Visando reproduzir no laboratório as condições de campo, reduziu-se, por recomendação do fabricante, a quantidade de água contida nas amostras em 40%, com uma tolerância permitida de ± 5 . Também no estudo, em procedeu-se a cura dos corpos de prova, diferente do prescrito pela metodologia do fabricante, ao ar livre durante os períodos estabelecidos e propostos para essa pesquisa.

3.2.2.2 Solo-EMC²®.

No caso do estabilizante químico EMC²®, executaram-se as seguintes etapas:

a) Diluição do produto em água, na ordem de 5% em 1 litro de água (50ml do produto EMC² em 1 litro de água destilada).

b) Separou-se 30kg de solo divididos em 5 partes com 6kg cada. Procedeu-se, então, o ensaio de compactação com a mistura solo com água + solução a 5%. Para cada 6 kg de material usou-se 2% da solução previamente preparada.

Por exemplo: para o 1º ponto, adicionou-se 480ml de água, em 6kg de material, que totaliza 8% de água adicionada, e 120ml de solução para cada 6kg de material. Partindo sempre do pressuposto que a dosagem recomendada é de 1 litro do produto (EMC²) para 30m³ de material.

3.2.2.3 Solo-TERRAZYME®.

A formulação com o estabilizante químico TERRAZYME® seguiu a análoga sistemática empregada com o aditivo EMC²®. Acompanhando as orientações do fabricante executaram-se as seguintes fases para confecção e compactação dos corpos de prova:

- a) Dosagem: 1 litro TZ / 30 m³ de solo seco, sendo a solução aquosa de laboratório à 1% do concentrado TZ.
- b) Mistura do solo com estabilizante (TZ) e água (H₂O). Na sequência homogeneizou-se a composição e acondicionou-se a mistura em pacote plástico por 24 horas.
- c) Compactação: Guardou-se a mistura durante 24 horas para realização do Proctor Intermediário.
- d) Cálculos realizaram-se em conformidade com a equação 3.

$$M_{chs} = M_s \cdot D \quad (g) \quad (3)$$

sendo:

M_s - massa do solo seco

D - densidade seca máxima.

3.2.3 Solo-aditivo-geogrelha.

Incluiu-se a participação de um tipo de geossintético nas amostras com a presença do estabilizante ECOLOPAVI®. Confeccionaram-se ao todo 8 (oito) corpos de provas, sendo 2 (duas) amostras para as cada uma das seguintes formulações: solo natural, solo-aditivo, solo-geogrelha e solo-aditivo-geogrelha. A compactação e confecção dos corpos de prova, acompanharam às orientações da NBR-7182 (ABNT, 2016), para a energia do Proctor Intermediário. O processo de moldagem seguiu a recomendação do fabricante abordada no item 3.2.2.1, além da inclusão de duas amostras circulares de geogrelha com 8 cm de diâmetro, dividindo o corpo de prova compactado em 3 (três) camadas de aproximadamente 4,2 cm de altura. A secagem e cura realizou-se similar aos procedimentos executados para a mistura solo-ECOLOPAVI®, ou seja, ao ar livre, porém, durante 3 (três) dias. Escolheu-se esse tempo de cura pela maior agilidade das atividades de construção em campo.

3.3 ANÁLISE MINERALÓGICA

Tanto as propriedades químicas como as físicas do solo são amplamente controladas pelos seus minerais, de maneira especial por aqueles integrantes da fração argilosa. Tais materiais, devido à pequena dimensão dos seus cristais, associada à variabilidade das suas respectivas formas e arranjos estruturais, necessitam do emprego de várias técnicas e métodos analíticos para a respectiva identificação, caracterização e quantificação (SILVA, 2010). No presente trabalho analisaram-se o solo natural e as amostras estabilizadas, pelos ensaios de Fluorescência de Raios-X e Difração de Raios X, empregando-se o método do pó.

3.3.1 Fluorescência de Raios-X (FRX).

Técnica que permite a identificação dos elementos químicos que compõem a amostra a partir das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos, quando devidamente excitados. Tal metodologia é usada tanto para amostras sólidas quanto para líquidas (SANTOS et al., 2013). A FRX estabelece a proporção em que cada elemento se encontra presente na amostra, e realiza-se excitando os átomos da substância que se pretende analisar usando uma fonte de radiação de elevada energia (radiação gama ou radiação X). Quando um átomo no estado fundamental fica sob a ação de uma fonte externa de energia, como raios X, ele absorve esta energia promovendo elétrons a níveis de energia mais elevados, causando a instabilidade do átomo. Ao buscar tal condição e retornar ao estado fundamental, ocorre uma liberação de energia, com a fluorescência, sendo essa emitida pelas características de comprimento de onda dos elementos presentes na amostra (FERREIRA, 2016).

Na análise mineralógica do solo natural e composições, pela técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) por energia dispersiva, utilizou-se o equipamento Espectrômetro PANalytical, modelo EPSILON 3 XL (Figura 16), pertencente ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC-UFAM). O experimento realizou-se conforme as seguintes características: tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA, e a presença do gás hélio na pressão 10 atm./10 kgf/cm.



Figura 16 - Espectrômetro de fluorescência de Raios X da PANalytical - Epsilon 3XL.

3.3.2 Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios X (DRX) consiste em uma técnica que fornece informações amplas, precisas e detalhadas quanto à qualificação, caracterização e quantificação dos minerais presentes em uma argila (GOMES, 1988). Tal processo consiste na interação entre a radiação eletromagnética (raios X) e a matéria ordenada. Para a ocorrência da difração é necessário que o comprimento de onda da radiação incidente, seja da mesma ordem de grandeza do espaçamento interatômico do material analisado, isto é, da ordem de angstrom. A convergência de raios X sobre um átomo provoca o espalhamento da radiação em todas as direções. A interferência construtiva dos raios X espargidos, provenientes de vários átomos, caracteriza a difração. Por meio da mencionada técnica é possível fazer identificação de fases cristalinas, diferenciação dos estados amorfos, reconhecimento de soluções sólidas, análise de microestrutura (tamanho de partículas, tensões, falha de empilhamento, etc.), identificação qualitativa e quantitativa de fases, isomorfismo, polimorfismo, medidas de parâmetro de rede e expansão térmica, orientação preferencial, acompanhamento de reações de estado sólido, estudos *in situ* em condições de temperatura e pressão (CHUNG; SMITH, 1999; MITTEMEIJER; SCARDI, 2013; SURYANARAYANA; NORTON, 2013).

No caso de um cristal, a sequência ordenada e periódica de átomos, pode ser visualizada como um conjunto de planos, os quais são denominados planos cristalográficos e que são indexados por meio dos índices de Miller (hkl). O espalhamento coerente dos raios X (mesma energia da radiação incidente) em um conjunto de planos cristalinos (hkl) ocorre em um ângulo bem definido, denominado ângulo de Bragg. A

condição estabelecida pela Lei de Bragg (KLUG & ALEXANDER, 1974) é dada pela equação 4.

$$\pi\lambda = 2d_{hkl} \cdot \text{sen}\theta_{hkl} \quad (4)$$

sendo:

n - ordem de difração (normalmente considera-se n=1)

λ - comprimento de onda da radiação incidente

d_{hkl} - distância interplanar

θ_{hkl} - semi-ângulo de difração medido em relação aos raios incidentes.

Os valores de d_{hkl} para compostos padrões são tabelados e disponíveis em microfichas ou CD-ROM do sistema ICDD (JCPDS) da International Union of Crystallography (SCAPIN, 2003). No estudo em evidência empregou-se a técnica de difração de raios X (DRX) usando-se o equipamento da PANalytical, modelo Empyrean (Figura 17), de propriedade do Laboratório de Materiais do Departamento de Física da Universidade Federal do Amazonas, conforme radiação de Cu-K α ($\lambda=0,1541838$ nm) e em uma faixa angular de 10 - 100° de 2θ . O passo e o tempo por passo foram 0,02° de 2θ e 60 s, respectivamente. O aparato instrumental possui: geometria do goniômetro, Θ - Θ (Theta-Theta) horizontal; tubo de Raios X, Cu; soller; detector PIXcel; e módulo Bragg-Brentano.



Figura 17 - Difratorômetro de Raio X da PANalytical - Empyrean.

Consoante aos dados coletados por meio da análise DRX, identificaram-se as fases presentes nos materiais por meio da comparação do padrão das amostras estudadas com os cristalográficos (CIF- Crystallographic Information File) pertencentes a base de dados ICSD (Inorganic Crystal Structure Database). Participaram dessa análise o material “in natura”, três aditivos usados para a estabilização do solo (ECOLOPAVI®, EMC²®, TERRAZYME®), três composições com cada aditivo após tempos de cura de 3,7 e 28 dias. Para o cálculo do grau de cristalinidade, usou-se o índice de Hinckley (IH) dado pela equação 5.

$$HI = \frac{A + B}{A_t} \quad (5)$$

sendo,

HI - índice de Hinckley

A - altura do primeiro pico, até o primeiro vale do plano (020)

B - altura do último pico, até o vale que antecede plano (1 1 -1)

A_t - altura do pico mais alto no intervalo 19 a 23° par 2θ.

Aponta SANTANA (2016), que se descreve a cristalinidade e o grau de ordem/desordem da caulinita, segundo as reflexões (020), (1 -1 0) e (1 1 -1) localizadas no intervalo entre 19° a 23° de 2θ. Valores do IH >1,0 indicam alta cristalinidade ou ordenamento; entre 0,5 e 0,75 considera-se baixo e < 0,5, muito baixo.

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Nesta etapa os corpos de prova foram submetidos aos ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Resistência à Compressão Simples, por meio de uma *Universal Testing Machine*, pertencente ao Grupo de pesquisa em Geotecnia da Universidade Federal do Amazonas (GEOTEC/UFAM).

3.4.1 Resistência à Tração (RT) por Compressão Diametral.

Em testes que visam calcular de forma direta a resistência à tração, tem-se, em

regra, dificuldades relacionadas ao custo do equipamento para realização desse tipo de teste, além de da concentração de tensões nos pontos de tração nos corpo-de-prova. No trabalho em apreço determinou-se a Resistência à Tração (RT) por compressão diametral em amostras cilíndricas. Aplicaram-se as cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais, diametralmente opostas, com uma velocidade constante de 0,8 mm/s. A tensão de compressão produz tensões transversais (tração) uniforme ao longo do diâmetro vertical. O teste foi conduzido pela norma NBR 7222 (ABNT, 2010), acompanhado pelo software *UTS002 3.12 Stress Strain Test*. Calculou-se a RT em conformidade com a equação 6.

$$RT(\sigma_t) = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (MPa) \quad (6)$$

sendo,

σ_t - resistência à tração (MPa)

F - carga de ruptura (N)

d - diâmetro do corpo de prova (cm)

h - altura do corpo de prova (cm).

3.4.2 Resistência à Compressão Simples (RCS) com e sem geogrelha

Determinou-se a Resistência à Compressão Simples (RCS), acompanhando a equação 7, das amostras naturais e composições com ou sem a participação a geogrelha, seguindo os procedimentos da norma NBR 12770 (ABNT, 1992), no qual as cargas são aplicadas no sentido axial. Executou-se o teste em consonância com o software *UTS002 3.12 Stress Strain Test*.

$$RCS(q) = \frac{4F}{\pi \cdot d^2} \quad (MPa) \quad (7)$$

sendo,

RCS (q) - resistência à Compressão Simples (MPa)

F - carga de ruptura (N)

d - diâmetro do corpo de prova (cm).

CAPÍTULO 4

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os resultados dos experimentos realizados, cujas metodologias detalharam-se no Capítulo 3.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Solo e Aditivos

O material natural é procedente do Ramal do Puraquequara, situado na divisa entre Manaus e Rio Preto da Eva, no Amazonas. A Figura 18 ilustra o local da jazida. Verificou-se na sua distribuição granulométrica, obtida por meio do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação, e observando a NBR 7181 (ABNT, 2016), as seguintes frações: 2,3% de pedregulho, 41,4% de areia, 8,9% de silte e 47,4% de argila. Portanto, uma argila arenosa. A massa específica dos grãos registrou valor igual a 2,54 g/cm³. Referente aos limites de consistência, estes evidenciaram limite de liquidez e limite de plasticidade de 33,2% e 12,1%, respectivamente. Portanto, um índice de plasticidade igual a 21,10%, que tipifica o material como de plasticidade alta (DAS, 2016). Pelo teste de compactação, na energia do Proctor intermediário, obteve-se a umidade ótima ($\omega_{ót}$) igual a 12,1% e a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$) de 1,944 g/cm³. Reunindo os dados da granulometria e dos Limites de Atterberg classificou-se o solo como A-4 e CL em concordância com os sistemas AASHTO e Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), respectivamente.

Referente aos aditivos, a Tabela 4 mostra as suas características físico-químicas, em concordância com os seus respectivos representantes comerciais. Evidencia-se que, na formulação com o ECOLOPAVI®, tendo em vista a granulometria do solo do tipo argilo-arenoso, foi necessário a adição do reagente do tipo cal hidratada igual a 2% em peso.



Figura 18 - Retirada do solo da jazida no Ramal do Puraquequara.

Tabela 4 - Propriedades Físico-químicas dos Aditivos

| Propriedades | Características | | |
|----------------------------------|---|---|---|
| | ECOLOPAVI® | EMC ² ® | TERRAZYME® |
| Aspecto | líquido transparente | líquido | líquido escuro |
| Cor | castanho | castanho | marrom escura |
| Odor | característico | característico | característico |
| Solubilidade | total | total | total |
| Alcalinidade livre c/ (NaOH) | 0,7% a 1,5% | 0,9% a 1,3% | 0,7% a 1,5% |
| Densidade 20°C +/- 4°C | 1,050 g/ml a 1,070 g/ml | 1,020 g/ml a 1,050 g/ml | 1,060 g/ml a 1,080 g/ml |
| Insolúveis em álcool etílico | máximo 1% | - | - |
| Sólidos totais a 105°C (3 horas) | 40,0% a 42,0% | - | - |
| pH concentrado | 12,00 a 14,00 | 8,5 | 4,3 a 5,3 |
| Toxicidade | não tóxico, não inflamável, não corrosivo | não tóxico, não inflamável, não corrosivo | não tóxico, não inflamável, não corrosivo |
| Resfriamento de 0° a 5° | não precipita, não turva, não solidifica | - | - |

Fontes: IDESA da Amazônia (2018), BASEFORTE (2017) e Nature Plus Inc (2018)

4.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A obtenção das amostras e medidas por Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difração de Raio-X (DRX) realizaram-se no Laboratório de Materiais (LabMat) e no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC), ambos da UFAM. As Figura 19 e 20 ilustram atividades pertinentes aos citados experimentos.



Figura 19 - Amostras do Solo natural sendo preparadas para ensaio de FRX.



Figura 20 - Amostra do Solo natural e demais utensílios para teste de DRX.

Obtidos os difratogramas, estes foram submetidas a identificação de fases, por meio de comparações com padrões teóricos (CIF - Crystallographic Information Framework) disponibilizados no Inorganic Crystal Structure Database - ICSD. Nesse contexto, entendem-se como “padrões teóricos” as referências de fases determinadas por raio-X e calculadas a partir de medidas experimentais.

4.2.1 Solo Natural

Pela análise por fluorescência de raios X, segundo energia dispersiva, determinou-se a estequiométrica de cada elemento presente na amostra de solo natural. Verificam-se nos resultados encontrados (Tabela 5), em forma elementares e óxidos. Tais dados

auxiliaram na identificação das fases cristalinas, por meio da comparação com os padrões cristalográficos (CIF- Crystallographic Information File) existentes no Inorganic Crystal Structure Database (ICSD). Pertinente a citada tabela, distinguiram-se duas fases cristalográficas. Uma delas mostrando a presença do argilomineral caulinita ($\text{Al}(\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$), por meio do padrão CIF - 63192-ICSD, e a outra, correspondente a presença do Quartzo SiO_2 , observado conforme a referência CIF - 39830- ICSD. Gerou-se, também, um difratograma contendo essas fases, que pode ser verificado na Figura 21. Outras informações sobre as estruturas reconhecidas no material “in natura” são expostas na Tabela 6. Após tais resultados (FRX e DRX) obtiveram-se modelos tridimensionais dessas estruturas cristalinas pelo software Mercury (Tabela 7).

Tabela 5 - Dados da FRX alusiva ao Solo natural.

| Elementos | Al | Si | P | K | Ca | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Zn | Ga | As |
|--------------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|
| Presença (%) | 32,100 | 55,271 | 1,111 | 0,107 | 0,475 | 3,181 | 0,055 | 0,032 | 0,015 | 6,322 | 0,006 | 0,019 | 0,002 |
| Óxidos | Al_2O_3 | SiO_2 | P_2O_2 | K_2O | CaO | Ti | V | Cr | Mn | Fe_2O_2 | Zn | Ga | As |
| Presença (%) | 36,528 | 57,167 | 1,039 | 0,051 | 0,260 | 1,216 | 0,055 | 0,012 | 0,005 | 3,260 | 0,006 | 0,019 | 0,002 |

Tabela 6 - Estruturas identificadas (CIF), pela FRX, no Solo natural.

| Fase | CIF | Grupo esp. | Estrutura | a | b | c | α | β | γ | Referência |
|--|-------|------------|------------|-------|-------|-------|----------|---------|----------|---|
| SiO_2 - (Silicon oxide - alpha) | 39830 | P1 (1) | Triclinica | 4,916 | 4,916 | 5,407 | 90 | 90 | 120 | On the structure of alpha - SiO_2 crystals doped with Fe^{3+} , Zhurnal Neorganicheskoi Khimii (1993) 38, p44-50. |
| $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ - Kaolinite 1A | 63192 | C1 (1) | Triclinica | 5,15 | 8,94 | 7,4 | 91,7 | 104,8 | 89,8 | Rietveld refinement of non-hydrogen atomic positions in kaolinite, Clays and Clay Minerals (1989) 37, p289-296 DOI:10.1346/CCMN.1989.0370401 |

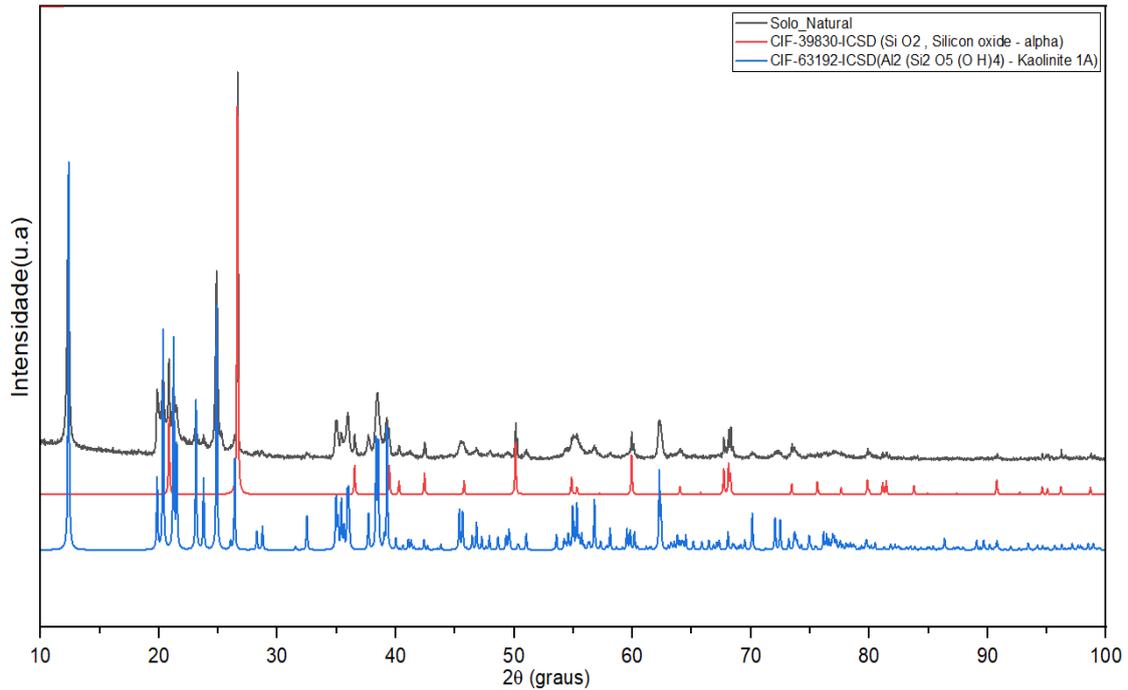
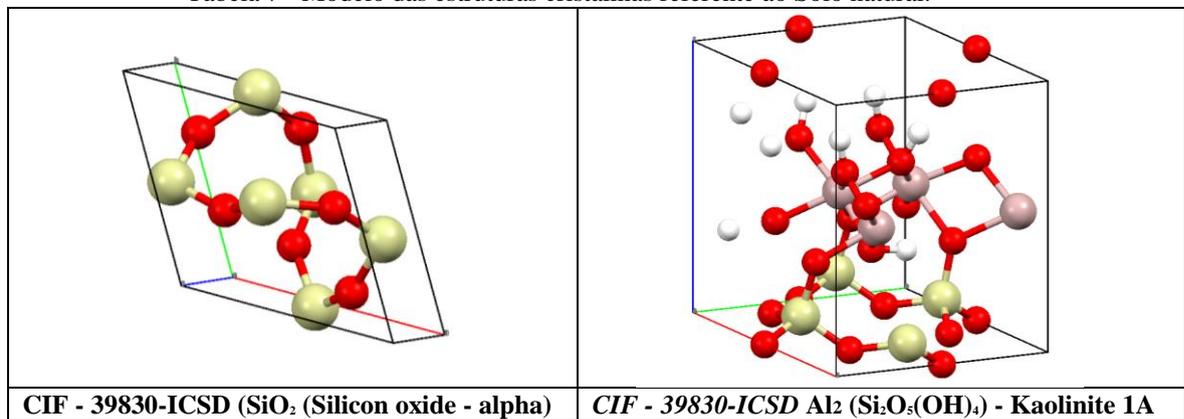


Figura 21 - Difratoograma do Solo natural.

Tabela 7 - Modelo das estruturas cristalinas referente ao Solo natural.



Salienta-se o alto teor de alumino (32,1%) e sílica (55,27%) identificados, que se fizeram presentes nas duas estruturas encontradas, correspondentes as fases da Caulinita e do Quartzo. A presença dos elementos Ti (3,18%), Fe (6,32%), P (1,11%), bem como os demais, não foram associadas a nenhum padrão. Por conta disso, concluiu-se que tais elementos estão na forma não cristalina e, possivelmente, possam ser considerados como contaminantes no material, e influenciar na coloração.

4.2.2 Composições solo-produtos

Também em função da caracterização mineralógica pelo ensaio de raios-X e em

comparação com solo natural, avaliou-se nas composições solo-produtos o efeito ou influência dos tempos de curas no processo de estabilização do solo, expostas nas figuras 22 a 24, pela participação dos aditivos TERRAZYME®, EMC²® e ECOLOPAVI®, respectivamente. Registram-se que, independentemente dos tempos de cura (3, 7 e 28 dias), não se verificaram variações na estrutura das composições constatadas nos difratogramas, tendo a participação dos aditivos TERRAZYME® (Figura 22) e EMC²® (Figura 23). No entanto, no difratograma exibindo a composição aditivada com o ECOLOPAVI (Figura 24), distinto das formulações com os demais produtos, é possível registrar a presença de um novo pico cristalográfico na posição 29,4° de (2θ).

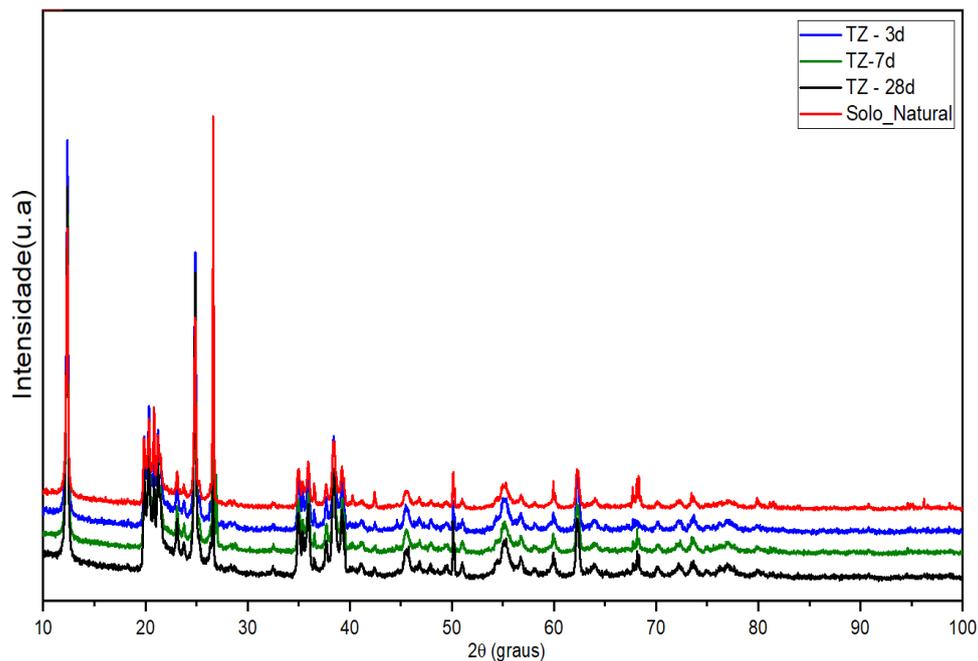


Figura 22 - Difratograma do Solo natural e das Composições do solo com TerraZyme®.

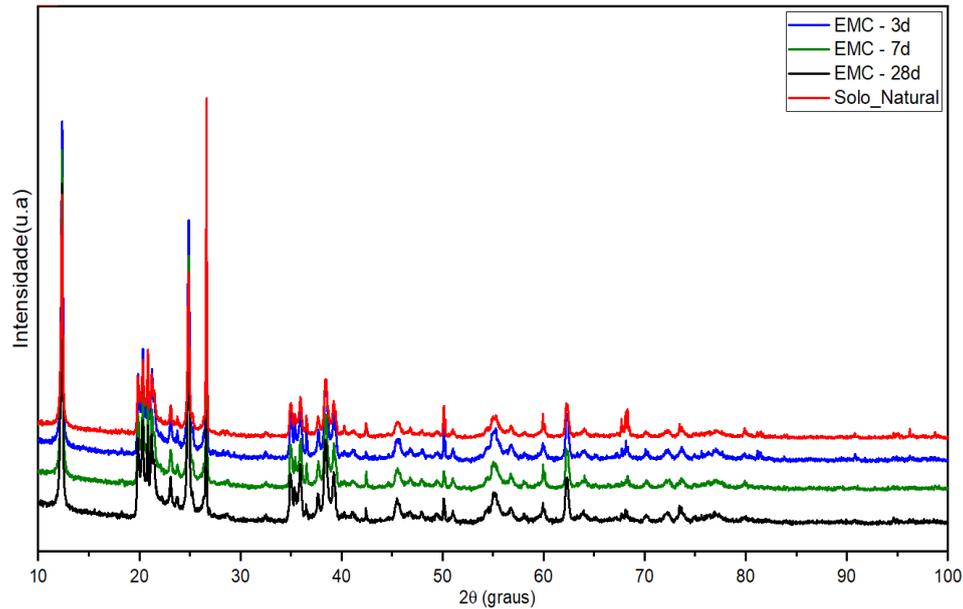


Figura 23 - Difratoograma do Solo natural e das composições do solo com EMC²®.

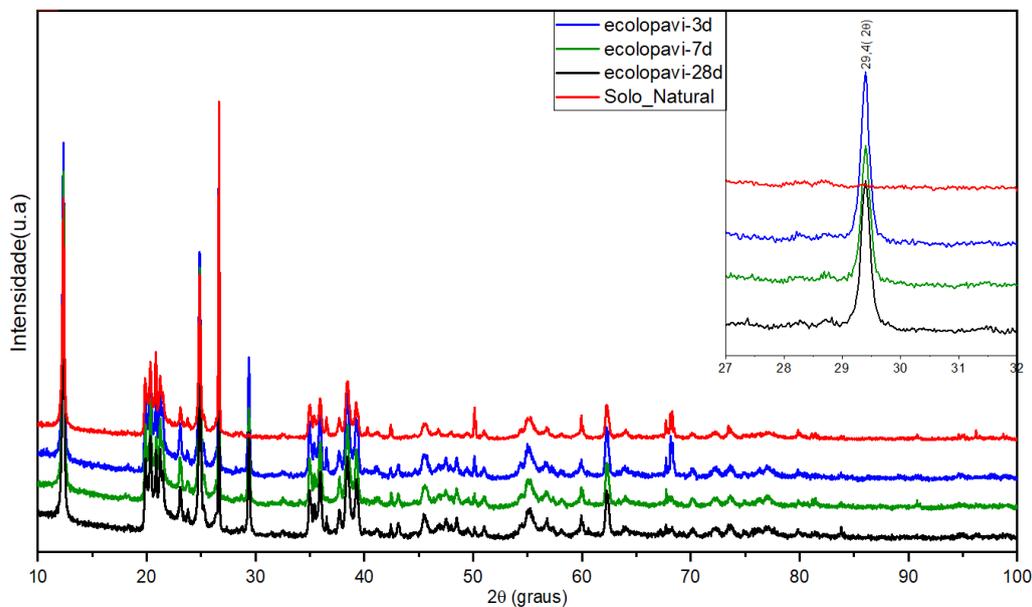


Figura 24 - Difratoograma do Solo natural e das composições do solo com ECOLOPAVI®.

Frisa-se que, de posse da identificação do padrão de caulinita no solo natural, gerou-se um difratograma (Figura 25) da amostra desse material com adição de ECOLOPAVI - 28d (mistura com tempo de cura de 28 dias). Teve-se como finalidade o cálculo do índice de Hinckley e, portanto, a determinação do grau de cristalinidade. Registrou-se valor de 1,09 (Tabela 8), sendo considerado alto para as amostras que

apresentam caulinita na sua estrutura.

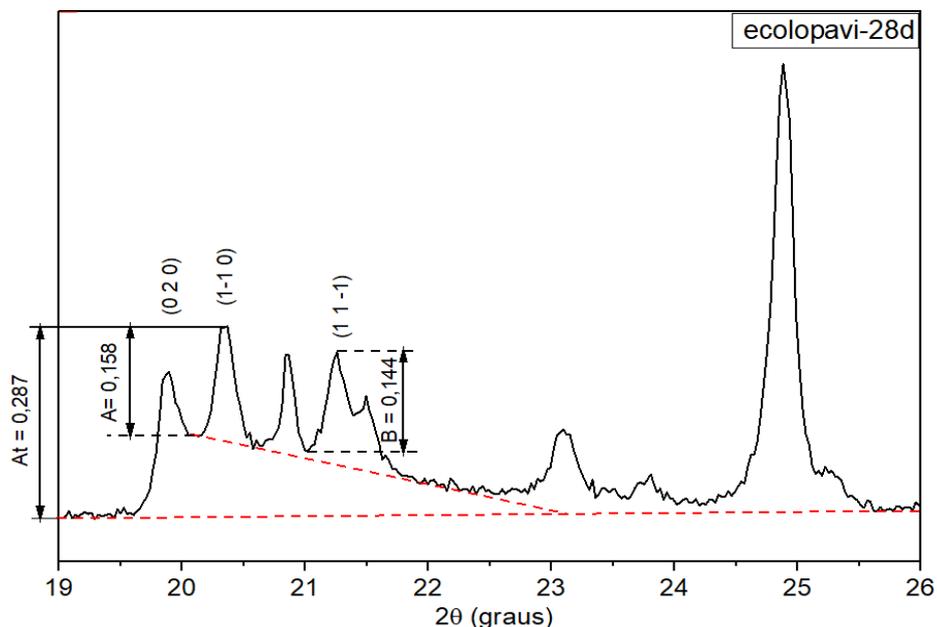


Figura 25 - Índice de Hinckley da composição Solo natural com ECOLOPAVI® aos 28 dias.

Tabela 8 - Grau de Cristalinidade pelo Índice de Hinckley.

| Dados | A_t | A | B | HI |
|-----------|-------|-------|-------|-------------|
| Máximo | 0,341 | 0,342 | 0,305 | 1,09 |
| Mínimo | 0,063 | 0,184 | 0,161 | |
| Dimensões | 0,278 | 0,158 | 0,144 | |

4.3 LIMITES DE ATTERBERG

O resultado proveniente da caracterização do solo natural assinalou um índice de plasticidade igual a 21,10%. Alusivo as composições do material “in natura” com aditivos, os limites de consistência mostraram valores muito próximos ou idênticos de LL e LP, conseqüentemente, não alterando os IP, independente do produto e do tempo de cura (Tabela 9). Salienta-se que, relativo ao solo natural, os resultados dos limites de Atterberg das formulações registraram diminuição de 33% para valores na faixa de 19 a 24% do Limite de Liquidez, e acréscimo de 12% para valores no intervalo de 14 a 16% do Limite de Plasticidade. Portanto, uma redução do índice de plasticidade, saindo de 21% para a faixa de 5 a 10%. Nota-se que, para a formulação com o ECOLOPAVI tal

decréscimo foi de cerca de 33,3%, com EMC² de 27,1% e com TERRAZYME igual a 33,3%.

Tabela 9 - Limites de Atterberg do Solo natural e Formulações.

| Amostra | Cura | Limite de Liquidez (%) | Limite de Plasticidade (%) | Índice de Plasticidade (%) |
|-----------------------|-------------|---------------------------------------|---|---|
| SOLO NATURAL | - | 33 | 12 | 21 |
| | 3 dias | 21 | 15 | 6 |
| SOLO-ECOLOPAVI | 7 dias | 21 | 15 | 6 |
| | 28 dias | 23 | 16 | 7 |
| | 3 dias | 19 | 14 | 5 |
| SOLO-EMC ² | 7 dias | 19 | 12 | 7 |
| | 28 dias | 21 | 16 | 5 |
| | 3 dias | 24 | 14 | 10 |
| SOLO-TERRAZYME | 7 dias | 20 | 14 | 6 |
| | 28 dias | 19 | 14 | 5 |

4.4 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS

Obtiveram-se os corpos de prova segundo a energia de compactação do Proctor intermediário, seguindo, em parte, as metodologias propostas pelos fabricantes de cada aditivo. Utilizaram-se essas amostras nos testes de Resistência à Tração (RT) por Compressão Diametral e Resistência à Compressão Simples (RCS) com e sem geogrelha. Deve ser lembrado que, se realizaram algumas modificações nos procedimentos indicados pelos fabricantes, com a finalidade de igualar as metodologias, independente do produto, como a não imersão em água dos corpos de prova. Moldaram-se 18 (dezoito) corpos de provas para cada composição, além do solo natural, totalizando 72 (setenta e dois) amostras e mais 08 (oito) para comparação e uso de geogrelha, que foram submetidos ao processo de cura de 3, 7 e 28 dias. As Figuras 26, 27 e 28 exemplificam tais amostras.



Figura 26 - Corpos de Prova das composições com ECOLOPAVI® em estufa para secagem a 60 °C.



Figura 27- Corpos de prova das composições com TERRAZYME® em processo de cura.



Figura 28 - Corpos de prova das composições com EMC²® em processo de cura.

4.5 ENSAIOS MECÂNICOS

4.5.1 Resistência à Tração (RT) por Compressão Diametral

Moldaram-se 03 (três) corpos de provas para cada condição, ou seja, solo natural e formulações com a participação de cada produto, perfazendo 36 (trinta e seis) amostras, em conformidade com os tempos de cura de 3, 7 e 28 dias. A Figura 29 exibe um corpo de prova sendo ensaiado.



Figura 29 - Rompimento de CP no ensaio de Resistência à Tração.

Consoante ao conjunto dos resultados (Figura 30), não se verificou, em regra, um comportamento padrão, ou seja, não se evidenciaram aumentos ou decréscimos da resistência à tração com o tempo de cura. No entanto, de forma isolada se registraram nas amostras compactados do solo natural, uma redução da RT de 48,5% e 28,7% de 3 dias para 7 e 28 dias, respectivamente.

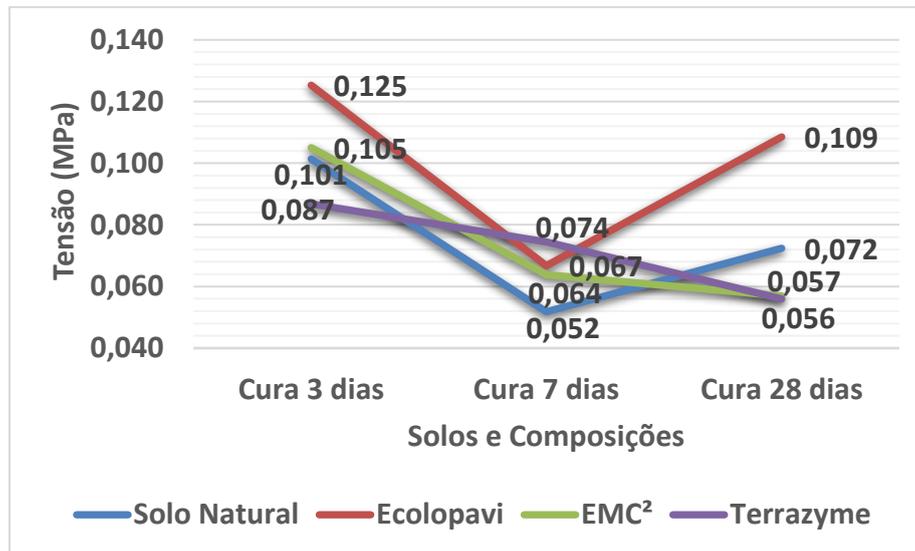


Figura 30 - Resistência à Tração x tempo de cura.

1) Composição com ECOLOPAVI®.

Os valores da Resistência à Tração mostraram (Figura 30) um decréscimo da RT, tendo como referência o período de 3 dias, de 46,4% para 7 dias e de 12,8% para 28 dias. Na comparação dos corpos de prova com ECOLOPAVI® respeitante: a) ao solo natural constataram-se acréscimos de 19,2%, 22,4% e 33,9% relativos a 3, 7 e 28 dias, respectivamente; b) as formulações com EMC²® apresentaram redução de 16,0% após os 3 dias de cura, 4,4% aos 7 dias de cura e 47,7% posterior aos 28 dias de cura; e c) as composições com o produto TERRAZYME® resultaram acréscimo de 30,4% para 3 dias de cura e redução de 9,5% aos 7 dias e 48,6% depois dos 28 dias de cura.

2) Composição com EMC²®

Nas misturas aditivadas com EMC²® ocorreu uma redução da Resistência à Tração por Compressão Diametral (Figura 30), respeitante ao período de 3 dias, igual a

39,0% e 45,7% para 7 e 28 dias, respectivamente. Confrontando tais valores observou-se: a) no solo natural, um pequeno aumento para duas das amostras constituídas por adições desse estabilizante, concernentes a 3 e 7 dias de cura com valores iguais a 3,8% e 18,8%, respectivamente, e aos 28 dias uma redução de 20,8%; b) nas misturas com TERRAZYME®, resultados que apontaram valores de 17,1% posterior aos 3 dias de cura, redução de 13,5% aos 7 dias de cura e praticamente não houve alteração a seguir aos 28 dias de cura.

3) Composição com TERRAZYME®

Certificou-se redução da Resistência à Tração (Figura 30), tendo como referência o período de 3 dias, igual a 14,9% e 35,6%, para 7 e 28 dias, respectivamente. Na comparação das amostras estabilizados com TERRAZYME®, no tocante: a) ao solo natural, os valores demonstram para os 3 dias de cura redução em 13,9%, para os 7 dias acréscimo em 29,7% e aos 28 dias decréscimo de 22,2%; b) aos outros produtos, no caso ECOLOPAVI® e o EMC²®, os resultados já foram apresentados nos subitens anteriores.

4.5.2 Resistência à Compressão Simples (RCS)

Assim como nos ensaios da RT, confeccionaram-se 03 (três) corpos de provas para cada condição, ou seja, solo natural e formulações aditivadas com cada produto individualmente, totalizando 36 (trinta e seis) amostras, de acordo com os tempos de cura de 3, 7 e 28 dias. A Figura 31 exemplifica um corpo de prova durante o experimento.



Figura 31 - Rompimento de CP no ensaio de RCS.

Consoante ao total dos resultados (Figura 32), não se constatou, na generalidade, um comportamento padrão, isto é, não se registraram aumentos ou decréscimos da resistência à compressão simples com o tempo de cura. Porém, pontualmente as amostras do solo natural, mostraram uma redução da RCS de 37,7% e 32,9% de 3 dias para 7 e 28 dias, respectivamente.

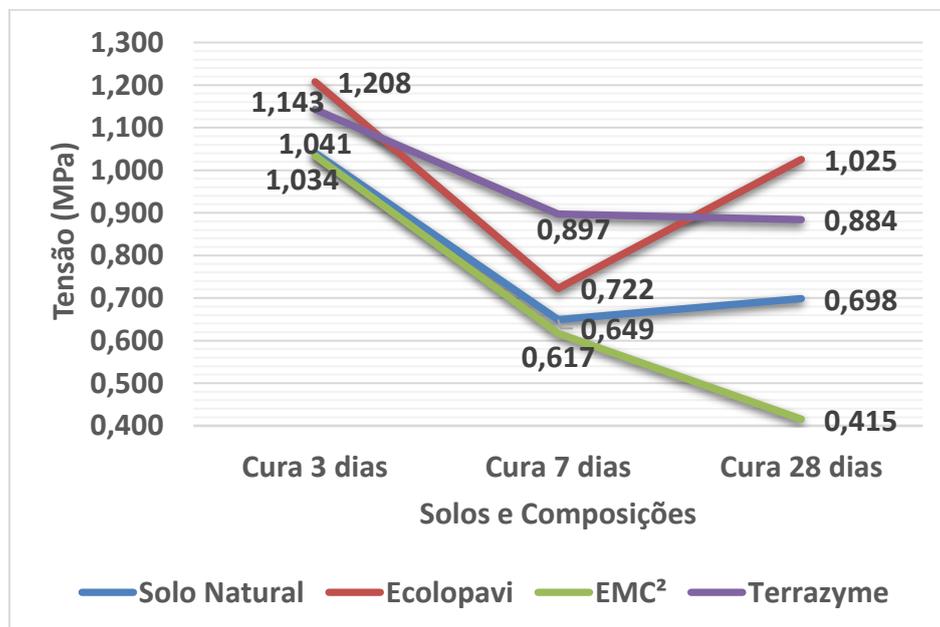


Figura 32 - Resistência à Compressão Simples x tempo de cura.

1) Composição com Ecolopavi®

Os valores da Resistência à Compressão Simples evidenciaram (Figura 32) um decréscimo da RCS, tendo como referência o período de 3 dias, de 40,2% para 7 dias e de 15,1% para 28 dias. No confronto dos corpos de prova estabilizados com ECOLOPAVI®, respeitante: a) ao solo natural constataram-se acréscimos de 13,8%, 10,1% e 31,9% relativos a 3, 7 e 28 dias, respectivamente; b) as formulações com EMC²® verificaram-se comparativamente redução de 14,4% após os 3 dias de cura, 14,5% aos 7 dias de cura e 59,5% após os 28 dias de cura; e c) as composições com o produto TERRAZYME® registraram-se redução de 5,4% para 3 dias de cura e acréscimo de 19,5% aos 7 dias e 13,8% depois dos 28 dias de cura.

2) Composição com EMC²®

Nas misturas aditivadas com EMC²® ocorreu uma redução da Resistência à Compressão Simples (Figura 32), respectivo ao período de 3 dias, igual a 40,3% e 59,8% para 7 e 28 dias, respectivamente. Confrontando tais valores observou-se, quanto: a) ao solo natural, que ocorreram distintas respostas por adições desse estabilizante. Concernentes a 3 dias de cura praticamente não se alterou, ou seja, em torno de 0,7%, para 7 dias de cura teve-se acréscimo de 4,9% e uma redução igual a 40,5% aos 28 dias; b) as formulações incluindo o TERRAZYME®, valor de 9,5% após os 3 dias de cura, redução de 53,1% aos 7 dias de cura e praticamente não se modificou para 28 dias de cura.

3) Composição com TERRAZYME®

Verificou-se redução da Resistência à Compressão (Figura 32), tendo como referência o período de 3 dias, igual a 21,5% e 22,7%, para 7 e 28 dias, respectivamente. Na comparação das amostras estabilizados com TERRAZYME® teve-se, indicativo: a) ao solo natural, acréscimo dos valores com aumento dos tempos de cura em 8,9% para os 3 dias, 27,6% para os 7 dias e acréscimo em 21,0% aos 28 dias; b) as composições aditivadas com os outros produtos, ECOLOPAVI® e o EMC²®, resultados já discutidos nos subitens anteriores.

4.5.3 Resistência à Compressão Simples (RCS) com Ecolopavi® e Geogrelha.

Neste subitem discutem-se os resultados da Resistência à Compressão Simples com a presença da geogrelha nos corpos de prova tendo a inclusão do ECOLOPAVI®.

Utilizaram-se em 02 (duas) malhas, dividindo o solo compactado em 03 (três) camadas com cerca de 4,3cm cada. A Figura 33 e 34 exibem o modelo de um corpo de prova com a geogrelha separando camadas de solo e um detalhe da inserção desse geossintético na amostra durante o processo de compactação.

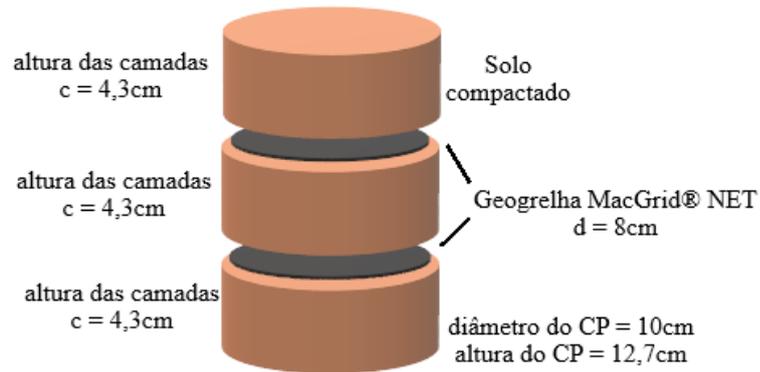


Figura 33 - Modelo dos corpos de prova em 3 camadas e com geogrelha para o ensaio de RCS.



Figura 34 - Geogrelha posicionada no molde cilíndrico durante o processo de compactação.

Confeccionaram-se 08 (três) corpos de provas, sendo 02 (dois) para cada condição: solo natural, solo natural com geogrelha, formulação solo com Ecolopavi e a composição solo com Ecolopavi e geogrelha. Avaliou-se a participação do geossintético para a composição com a melhor resposta advinda da estabilização química, caso da mistura com o Ecolopavi e para o tempo de cura de 3 dias, tendo como finalidade retratar condições mais prementes de campo.

Os valores da Resistência à Compressão Simples (Figura 35), tendo-se o geossintético integrando o corpo de prova, mostraram, para o período de 3 dias: a) acréscimos de 51,1% das mostras do solo natural com geogrelha atinente à formulação apenas com o material natural; b) aumento de 2,9% das amostras solo natural com ECOLOPAVI® respeitante ao solo “in natura”; e c) um considerável acréscimo de 75,5% das composições do solo aditivado com ECOLOPAVI® e presente a geogrelha, concernente à formulação solo natural com ECOLOPAVI®.

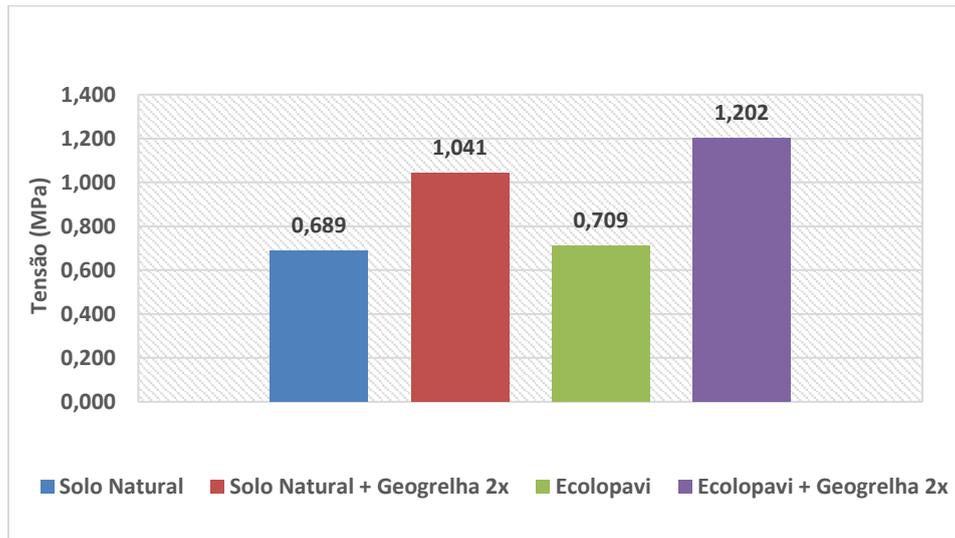


Figura 35 - Resistência à Compressão Simples com a presença da geogrelha.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

São apresentadas neste capítulo as principais conclusões do trabalho. Também sugestões para futuras pesquisas, com a finalidade de complementar as análises efetuadas na estabilização química do solo argiloso pelos aditivos ECOLOPAVI®, EMC²® e TERRAZYME®, e pela presença da geogrelha MacGrid® NET, visando a construção de base e sub-base de pavimentos regionais de importância para a Engenharia Militar do Exército Brasileiro.

5.1 CONCLUSÕES

A análise granulométrica mostrou o solo natural, oriundo do Ramal do Puraquequara, com predominância argilosa e classificado como A-4 e CL em concordância com os sistemas AASHTO e Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), respectivamente.

Os limites de Atterberg das composições, independentemente do tempo de cura, apresentaram valores muito próximos de LL e LP e, em relação ao solo natural, redução do primeiro e acréscimo do segundo, respectivamente.

No caso da caracterização mineralógica, obtida pelos ensaios de Fluorescência e Difração de Raio-X, identificou-se no solo natural um alto teor de óxido de alumínio (36,5%) e dióxido de silício (57,2 %), além de contaminantes como óxido de ferro (3,26%), óxido de fósforo (1,04%), e traços dos outros elementos. Particularmente, por meio do DRX, distinguiu-se padrões estruturais do material “in natura”, mostrando a presença da caulinita e do quartzo. Ressalta-se também que as amostras de solo natural aditivadas com ECOLOPAVI foram as únicas que retrataram transformação na sua estrutura, respeitante as demais formulações, evidenciando a formação de um pico adicional na posição de 29,4 (2 θ), em todos os tempos de cura estudados, podendo ter ocasionado os resultados mecânicos diferenciados. Além disso, por meio de DRX,

também se constatou alto grau de cristalinidade com valor de 1,09 para o tempo de cura de 28 dias.

No tocante aos resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral, das amostras estabilizadas pelos 03 (três) produtos individualmente, não apresentaram, em regra, comportamento padrão com o tempo de cura. No caso do solo natural e a formulação com o produto ECOLOPAVI® registrou-se redução da RT de 3 para 7 dias de cura, para um posterior aumento aos 28 dias de cura. Alusivo as composições com a participação dos produtos EMC²® e TERRAZYME®, estas denotaram progressivas reduções. Sublinha-se que a presença do ECOLOPAVI® acarretou os melhores valores da RT respeitante ao solo “in natura” e as demais formulações.

De acordo com os valores dos ensaios da Resistência à Compressão Simples, verificou-se que as amostras aditivadas pelos 03 (três) produtos individualmente, explicitaram resultados fora de um comportamento padrão. Respeitante as misturas com os aditivos EMC²® e TERRAZYME®, houve uma redução de seus valores com o transcorrer dos tempos de cura, exceto para as composições com o produto ECOLOPAVI®. Na comparação com o solo natural, as formulações com a presença dos produtos ECOLOPAVI® e TERRAZYME® obtiveram aumento da RCS nos 3 (três) tempos de cura pesquisados. Específico aos testes da RCS com a geogrelha MacGrid® NET e o produto ECOLOPAVI®, observaram-se aumentos consideráveis nos valores desse parâmetro para o tempo de cura de 3 (três) dias.

5.2 SUGESTÕES

a) Estudar as formulações pesquisadas com a participação de outros tipos de geossintéticos, e a inclusão de resíduos de baixo custo, como a cal de carbureto.

b) Pesquisar para as composições estudadas outros tempos de cura, em especial um valor acima de 28 dias.

d) Determinar a resistência mecânica das misturas pesquisadas em conformidade com os ensaios de cisalhamento direto, triaxial e módulo de resiliência.

e) Determinar a Resistência à Compressão Simples (RCS) das formulações aditivadas com ECOLOPAVI® e a participação da geogrelha MacGrid® NET, nos tempos de cura de 7 e 28 dias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, M. A.; et. al. **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação - Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento, ANO 1. VOL. 10, Pp. 187-196. Novembro de 2016 - ISSN.2448-0959

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).

_____. **NBR 6023**: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002b.

_____. **NBR 6024**: numeração progressiva das seções de um documento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 6027**: sumário. Rio de Janeiro, 2012b.

_____. **NBR 6028**: resumos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6458**: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459**: solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180**: solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181**: solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182**: solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7207**: terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 9895**: solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 10520**: apresentação de citações em documentos. Rio de Janeiro, 2002a.

_____. **NBR 12025**: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de

prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12024: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12023: Solo-cimento - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12253: solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12770: solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15287: projeto de pesquisa: apresentação.** Rio de Janeiro, 2011.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** 558 p. Oficina de Textos, 2007

BASE FORTE, 2017. Disponível em <<http://www.baseforte.net/producto.html>>. Acesso em 09/09/2017.

BRAZZYME, 2017. Disponível em <www.TerraZyme.com>. Acesso em 09 de setembro de 2017.

CALLISTER, Jr, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução.** LTC, v. 5º Edição, p. 38.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos.** Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas SP, 1986.

CHUNG, F. H.; SMITH, D. K. **Industrial applications of X-ray diffraction.** [s.l.] CRC Press, 1999.

CIVILIZAÇÃO ENGENHEIRA, Disponível em <https://civilizacaoengenhaira.wordpress.com/> - Acesso em: 04 de novembro de 2018

CRISTELO, N. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** Dissertação. Portugal, 2001. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Portugal.

D'ALMEIDA, J. R. M. **Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá.** Revista Matéria, v. 11, n. 3, p. 197-203, 2006.

DAS, B. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 2a. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

DER-SP. **Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais.** 1. Ed. São Paulo,

2012.

DER-PR. **Especificações de Serviços Rodoviários**. 1. Ed. Curitiba, 2012.

DER/PR ES-P 11/18. **PAVIMENTAÇÃO: SOLO-CIMENTO E SOLO TRATADO COM CIMENTO**. Curitiba, 2018.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084**: Agregado miúdo: Determinação de Densidade Real. Rio de Janeiro. 1995.

_____. **DNER-ME 085**: Material Finamente Pulverizado: Determinação de Densidade Real. Rio de Janeiro. 1994.

_____. **DNER-ME 092**: solo - Determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro. 1994.

_____. **DNER-ME 131**: Solos - determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro. 1994.

_____. **DNER-ME 181**: Solos - Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada - determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro. 1994.

_____. **DNER-ME 201**: Solo-cimento - compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 194**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3. Ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 134**: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo - de resiliência - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2010.

_____. **DNIT-ME 164**: Solos - Compactação utilizando amostras não trabalhadas - Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 2013.

ECOLOPAVI®, 2017. Disponível em <http://Ecolopavi@.com.br/atecnologia1.html>>. Acesso em 09/09/2017.

FERREIRA, J. M. O. **Síntese e Caracterização da liga Sn₂SSe nanoestruturada obtida por Moagem Mecânica de Alta Energia**. 2016. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

FERREIRA, J. A. Z. **Estudo De Reforço De Pavimentos Com Ensaio De Arracamento Em Equipamentos De Pequenas Dimensões**. 2007, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da

Universidade de São Paulo

FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI GRADE 81”**. Viçosa: Imprensa Universitária - Universidade Federal de Viçosa, 2003. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <http://www.ufv.br/dec/ppg/Teses/MS_Franca.pdf>. Acesso em: 3 de agosto de 2017.

KAKUDA F. M; PARREIRA A. B; FABBRI G. T. P. **Análise de um pavimento reforçado com geossintético a partir de resultados de ensaio em equipamento de grandes dimensões**. Revista Transportes, v. 19, n. 3 (2011) p. 28–34.

GF, **GEOFOCO BRASIL**. Disponível em <http://geofoco.com.br/> - Acesso em: 04 de novembro de 2018.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, C.F. **Argilas - O que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1988.

ICSD, **Inorganic Crystal Structure Database**. Disponível em: <http://www2.fiz-karlsruhe.de/icsd_home.html>. Acesso em 24 de outubro de 2018.

IGS Brasil, **Associação Brasileira de Geossintéticos**; Disponível em <http://igsbrasil.org.br/os-geossinteticos>. Acesso em: 04 de novembro de 2018.

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização de solos II - Técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa**. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 1993. 32 p.

KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E. **X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials: Wiley-Interscience**, New York, 2nd ed. 1974.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ. 2005.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995. 213p.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - CPGEC/UFRGS, Porto Alegre. 1991. 150p.

PANALYTICAL, Malvern. **The multipurpose solution for your analytical needs**. 2018. Disponível em: <<https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/empyrean-range/empyrean>>. Acesso em 22 de outubro 2018.

PEREIRA I. L.; OLIVEIRA, F.H.L.; AGUIAR, M.F.P. **Estudo de camadas granulares de pavimentos rodoviários reforçados com geogrelha**. 20º RPU - Reunião de Pavimentação Urbana, 2017. Junho, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

PICANÇO, H. M. **Incorporação de resíduo cerâmico a um solo argilosos superficial de Manaus visando seu emprego em pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia) - UFAM, Manaus. 2012. 59p.

REINERT, D. J.; REICHERT, José Miguel. **Propriedades físicas do solo**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006. Disponível em: <http://portais.ufg.br/up/68/o/An_lise_da_zona_n_o_saturada_do_solo_____texto.pdf>. Acesso em 09 de setembro de 2017

SANTANA, G. P.; SILVA, M. S. **Caulinita: Estrutura Cristalina, técnicas físicas de estudo e adsorção**. Scientia Amazonia, v. 2, n.3, 54-70, 2013, Revista on-line <http://www.scientia.ufam.edu.br>. 2013.

SANTOS, A. R. **Metodologia científica: a construção do conhecimento**. Rio de Janeiro: DP&A, 1999.

SCAPIN, M. A. **Aplicação da Difração e Fluorescência de Raios X: Ensaios em Argilominerais**. Dissertação Mestrado - Instituto Pesquisas Energéticas Nucleares, São Paulo, 2003.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2001.

SHIMADZU Corporation., “**Shimadzu X-ray Diffractometer XRD-6000**,” p. 24.

SILVA, C.C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2007.

SILVA, D. M.; DA SILVA, A. J.; DE OLIVEIRA QUEIROZ, F.. **Análise de Estabilização Química de Solo Siltoso A-4 de Porto Velho-RO**. E&S Engineering and Science, v. 4, n. 2, p. 13-22, 2015.

SILVA, M. B. **Análise gravimétrica de uma anomalia morfoestrutural na cidade Manaus-AM**. Dissertação de Mestrado em Geociências da UFAM. 102 p, 2010.

VALEJOS, C. V. et al. **Cálculo de ensaios laboratoriais de mecânica dos solos**. 2005. Disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/5/5a/Apostila2.pdf>

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. McGraw-Hill, Editora da Universidade de São Paulo, 1977.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Porto Alegre, 2003. 224 p. Tese (Doutorado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.