



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JENNIFER DOS SANTOS PINHEIRO

**USO DE ESTABILIZANTE QUÍMICO DE SOLO: ESTUDO DE CASO EM
RESIDENCIAL EM MACAPÁ**

MACAPÁ

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JENNIFER DOS SANTOS PINHEIRO

**USO DE ESTABILIZANTE QUÍMICO DE SOLO: ESTUDO DE CASO EM
RESIDENCIAL EM MACAPÁ**

MACAPÁ

2019

JENNIFER DOS SANTOS PINHEIRO

**USO DE ESTABILIZANTE QUÍMICO DE SOLO: ESTUDO DE CASO EM
RESIDENCIAL EM MACAPÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à banca examinadora do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia – DCET - da Universidade Federal do Amapá - UNIFAP, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil. Orientado pelo Prof.º Me. Regis Brito Nunes.

MACAPÁ

2019

FICHA CATALOGRAFICA

JENNIFER DOS SANTOS PINHEIRO

**USO DE ESTABILIZANTE QUÍMICO DE SOLO: ESTUDO DE CASO EM
RESIDENCIAL EM MACAPÁ**

Monografia apresentada como requisito para a
conclusão do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Amapá.

Orientador: Prof. MsC. Regis Brito Nunes.

Coorientador: Eng. Edir.

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. MsC. Regis Brito Nunes – Orientador
Universidade Federal do Amapá – UNIFAP

Eng. MsC. Adenilson Costa de Oliveira
Universidade Federal do Amapá - UNIFAP

Prof. MsC. Jonhhy Gilberto Moraes Coelho – Examinador externo
Instituto Federal do Amapá – IFAP

MACAPÁ, 2019

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter sido meu escudo, minha força e meu guia durante todas as turbulências que passei durante o período deste trabalho. Por ter correspondido à fé que nEle depositei e por não ter deixado eu cair.

Aos meus amores, meu pai e minha mãe, Raimundo Denilson Neves Pinheiro e Maria Jeçu Araújo dos Santos, que, sem dúvidas, são o motivo de tudo isso. Que mesmo sem condições, fizeram de todo esforço para levar-me ao mais longe que eu pudesse. E estou conseguindo! Por toda sabedoria, valores, educação, sermões e cinturadas, que fizeram ser quem eu sou hoje. Ao meu querido irmão, que me ajudou no que pôde para me ver aqui. Tudo isso dedico a vocês, os meus maiores bens de toda essa vida.

Ao meu fiel companheiro, amigo, incentivador e crítico, Caiã Fleixer de Oliveira Silva, a pessoa que não mediu atitudes para me crescer ao longo de todos esses anos, a pessoa que mais me ajudou neste trabalho, agarrou como se fosse nosso. E é. Essa conquista também é sua. Obrigada!

Ao meu professor Regis Brito Nunes, sendo sutilmente paciente e atencioso comigo, orientando-me com sua incomparável experiência, com puxões de orelha também, conduzindo-me a este tema e trabalho a qual me identifiquei.

E por fim, aos meus cachorrinhos Cometa e a Serena, que durante todas as tardes as quais digitava esse trabalho, os dois foram meus fieis companheiros.

RESUMO

Este trabalho teve por finalidade de estudo analisar o comportamento físico e mecânico do solo, localizado no Residencial Irmãos Platon, em Macapá-AP, mediante a adição do aditivo químico Oxnix para uso funcional como base de pavimento. Realizados através de ensaios respeitando a Norma vigente, e seguindo as orientações do fabricante do produto. Estudou-se a classificação do solo, a dosagem necessária, unindo as características necessárias e técnicas para o solo “in natura” e para o aditivado. Após os ensaios realizados, como granulometria, proctor, expansão, penetração e ISC (Índice Suporte Califórnia), o solo foi classificado como um silte argiloso, com menos de 5% de argila, o que não resultou numa boa estabilização com o aditivo químico, pois, segundo o fabricante, o solo precisa de no mínimo 30% de argila para que a estabilização seja adequada, logo, o gráfico do ISC apontou uma curva maior (com mais resistência) para o solo natural, com valor de 49% e um resultado inferior do solo aditivado, com valor de 42%, concluindo que a estabilização química com o produto Oxnix não surtiu efeito para o solo estudado, pois esta estabilização precisaria de um ISC de no mínimo 60%, indicado para tráfego médio.

Palavras-Chave: Estabilização de solo. Aditivo químico. Base de Pavimentos. Oxnix

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the physical and mechanical behavior of the soil, located in Residencial Irmãos Platon, in Macapá, by adding the chemical additive Oxnix for functional use as a base of pavement. Performed through tests in compliance with the current Standard, and following the guidelines of the manufacturer of the product. The soil classification and the necessary dosage, was studied, joining the necessary characteristics and techniques for the soil in natura and for the additived. After several tests, such as granulometry, proctor, expansion, penetration and CBR (California Bearing Ratio), the soil was classified as a clay silt with less than 5% clay, which did not result in a good stabilization with the chemical additive, which requires a minimum of 30% of it for stabilization to be adequate, so the ISC graph pointed a larger curve (with more resistance) to the natural soil and a lower result of the soil added, concluding that the chemical stabilization with the Oxnix product had no effect on the studied soil.

Keywords: Soil stabilization. Chemical additive. Base Course. Oxnix

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturação dos pavimentos flexíveis	19
Figura 2 - Estrutura Flucolenta.....	25
Figura 3 - Estrutura em Esqueleto.....	25
Figura 4 - Solo	26
Figura 5 - Limites de Consistência.....	28
Figura 6 - Aparelho de Casagrande	29
Figura 7 - Limite de Plasticidade.....	29
Figura 8 - Curvas de Compactação de Diversos solos brasileiros.....	32
Figura 9 - Molde cilíndrico, cilindro complementar e base metálica.....	33
Figura 10 - Ponto de Coleta do solo Natural, pontuado com coordenadas geográficas do local.	46
Figura 11 - Solo Extraído do Residencial.....	47
Figura 12 - Cal fornecida em sacos de 50 kg	47
Figura 13 - Aditivo químico Oxnix na embalagem.....	50
Figura 14 - Corpos de prova. Preparados segundo a NBR 9895.....	51
Figura 15 - Brita tirada do solo.....	52
Figura 16 - Ensaio Proctor do Solo Natural, sem brita.....	53
Figura 17 - Ensaio Proctor do Solo Tratado	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consistência em função da Resistência à compressão	27
Tabela 2 - Limites das Frações de Solo pelo tamanho dos grãos	31
Tabela 3 - Terminologia do sistema Unificado	35
Tabela 4 - Sistema de Classificação de Solos.....	36
Tabela 5 - Classificação dos Solos H.R.B.....	38
Tabela 6 - Terminologia das bases de pavimento.....	41
Tabela 7 - Normas referente aos ensaios	48
Tabela 8 - Resultado do Ensaio de Granulometria.....	57
Tabela 9 - Resultado da Classificação do Solo	57
Tabela 10 - Valores do Ensaio de Proctor	60
Tabela 11 - Resultado Final do Ensaio de Proctor	60
Tabela 12 - Quadro Resumo do solo Natural	62
Tabela 13 - Quadro Resumo do solo aditivado com Oxnix	63
Tabela 14 - Resultado do Ensaio de Expansão.....	64
Tabela 15 - Valores de Penetração segundo o DNIT	65
Tabela 16 - Resultado do ensaio de Penetração para o Solo natural	65
Tabela 17 - Resultado do Ensaio de Penetração do solo com aditivo Oxnix + Cal	66
Tabela 18 - Resultado do ensaio de ISC.....	67

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Índice IG	36
Equação 2 - Teor de umidade	58
Equação 3 - Massa específica aparente do solo úmido	59
Equação 4 - Massa específica do solo seco	59
Equação 5 - Expansibilidade	64
Equação 6 - Índice Suporte Califórnia.....	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de Compactção	60
Gráfico 2 - Gráfico do Resultado de ISC	68

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNT	Confederação Nacional de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
IG	Índice de Grupo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 Objetivo Geral.....	21
1.2.2 Objetivo Específico.....	22
1.3 JUSTIFICATIVA.....	22
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1 SOLO.....	23
2.1.1 Estrutura do Solo.....	24
2.1.1.1 Estrutura granular simples.....	24
2.1.1.2 Estrutura alveolar.....	24
2.1.1.3 Estrutura flocculenta.....	24
2.1.1.4 Estrutura em esqueleto.....	25
2.2 ÍNDICES FÍSICOS.....	25
Umidade (w).....	27
Índice de vazios (e).....	27
Porosidade.....	27
Grau de Saturação.....	27
Peso Específico Natural.....	27
Peso Específico Aparente Seco.....	27
Peso Específico Aparente Saturado.....	27
Peso Específico Aparente Submerso.....	27
Grau de Compacidade.....	27
Consistência ou Estado das Argilas.....	27
2.3 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE SOLO – Plasticidade e Consistência:.....	28
2.3.1 Limite de Liquidez (LL).....	28
2.3.2 Limite de Plasticidade (LP):.....	29
2.3.3 Índice de Plasticidade (IP):.....	30
2.3.4 Granulometria.....	30
2.3.5 Ensaio Proctor.....	31
2.3.6 Ensaio Califórnia.....	32

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	34
2.4.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos	35
2.4.2 Sistema de Classificação HRB/TRB.....	36
2.5 Pavimentos	38
2.5.1 Bases de Pavimento	39
2.6 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO	41
2.6.1 Estabilização Mecânica.....	42
2.6.2 Estabilização Granulométrica	42
2.6.3 Estabilização Química	43
2.7 ADITIVO QUÍMICO ESTABILIZANTE DE SOLO: Oxnix	44
3 METODOLOGIA.....	45
3.1 MATERIAIS	45
3.2 ENSAIO	48
3.2.1 Laboratório.....	49
3.2.1.1 Procedimento para o ensaio de compactação Oxnix com reagente Cal Hidratada	49
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA	57
4.2 RESULTADO DO ENSAIO DE PROCTOR	58
4.3 QUADRO RESUMO	61
4.4 RESULTADO DO ENSAIO DE EXPANSÃO	64
4.5 RESULTADO DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO	65
4.6 RESULTADO DO ENSAIO DE ÍNDICE SUPORTE CALIFÓRNIA	66
5 CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 INTRODUÇÃO

A história da pavimentação e sua estrutura, mesmo que nos dias atuais sejam utilizados meios tecnológicos e métodos mais desenvolvidos, é atrelada a história do desenvolvimento humano.

Senço (2007) complementa que a necessidade humana de se transportar é genuína, para a busca de água e alimento. Nesse ritmo, a evolução se manifestou, o homem procurou alternativas para trazer melhorias, tanto no tempo como no modo de locomoção. Exemplificando, o uso de animal até a criação do veículo, buscando um meio de criar um caminho mais durável e seguro, modificando o ambiente e seus caminhos, e devido as dificuldades que surgiram como grandes distâncias e cargas elevadas, elevou-se também o número de viagens, surgindo então, o pavimento.

Houve a necessidade, segundo Caputo (1988), de trabalhar com solo desde os tempos antigos quando houveram problemas de fundação e obras de terra das grandes construções como as pirâmides do Egito e estradas do Império Romano. Bem como os acidentes, levando o homem a estudar, classificar e trabalhar com o solo.

Uma grande dificuldade enfrentada até hoje: os caminhos de tráfego necessitam de facilidade de transito, em qualquer época do ano. E diante disso, foram sendo desenvolvidas técnicas e estudos para tal conforto, como a estabilização do leito da via.

Com essa evolução do pavimento, o investimento em construção de infraestrutura rodoviária se espalhou em todo mundo. Em 2015, aproximadamente US\$ 1,6 bilhões de dólares vindos da verba pública foram investidos na malha rodoviária brasileira, progredindo e finalizando diversas obras pelo país, segundo a Revista Núcleo do conhecimento (2017). Porém, ainda é nítido a necessidade de investimentos no setor.

Atualmente, a Revista Deconcic (CIESP, 2017) afirma que a frota rodoviária brasileira tem aproximadamente 93,9 milhões de veículos licenciados, crescente a uma taxa média por ano de 7,5%. Tal crescimento foi significativo no segmento de caminhões e motocicletas, bem como ônibus.

A fragilidade da infraestrutura logística no nosso território, sem dúvidas é um dos maiores impedimentos para o crescimento econômico. Perdendo espaço no cenário internacional, causado pela dificuldade de locomoção, incapaz de suprir à quantidade de carga necessária, prejudicando altamente a economia interna.

A falta de manutenção, ampliação, modernização e planejamento da malha rodoviária provocou um aumento ainda maior dos custos econômicos, perdendo competitividade interna e externa do país, e tornou-se uma patologia de grande relevância para nossa economia.

Para alcançar uma melhoria significativa do modal rodoviário, exige-se uma cooperação do setor privado e governamental do país. Aprimorando projetos e processos, buscando inovação e qualidade. Fazendo-se necessário o cuidado e manutenção do pavimento das vias, e assim evitar futuras obras de reforma, que na maioria dos casos, o custo é altamente prejudicial. Valendo ressaltar a importância e o bom cumprimento do projeto de pavimentação.

As principais causas de tal patologia é na sua infraestrutura do pavimento. Com a modernização, o uso de aditivos é uma boa alternativa para a melhoria dessa base estrutural, aumentando sua capacidade de resistência e baixando sua expansão, na maioria das vezes. Entre vários, o aditivo químico escolhido para este trabalho foi da empresa Oxnix.

A Pesquisa CNT de Rodovias (2017) indica uma piora na qualidade das rodovias. Segundo dados da pesquisa, em 2017, “61,8% da extensão das rodovias pesquisadas tiveram o estado geral considerado regular ou péssimo”, e o motivo, segundo a CNT, “foi a redução dos investimentos em infraestrutura rodoviária”. Mais ainda, “a sinalização foi a que mais se deteriorou”, a qualidade do pavimento que mais da metade tem qualidade regular, ruim ou péssima.

Faltam investimentos, e segundo o Plano CNT de Transporte e Logística seria necessário investimento na ordem de US\$ 74,9 Bilhões para dar ao país uma infraestrutura rodoviária adequada à demanda nacional.

No Amapá, segundo dados do IBGE (2017), a quantidade de veículos em 2016 foi de 179.665 mil veículos.

Para a Pesquisa CNT de Rodovias (2017), o Amapá tem sido o pior estado geral das rodovias pesquisadas em todo país. O resultado da pesquisa mostrou que mais de 96%, aproximadamente 488 km, dos trechos analisados apresentam alguma “deficiência” no estado geral, também com classificação regular, ruim ou péssima. Foram analisados 505 km pela CNT em 2017.

No estado, o aumento do custo operacional devido as condições do pavimento chega a 25,1% do transporte rodoviário, segundo a pesquisa CNT para o estado do Amapá. Na avaliação da Conferência Nacional de Transportes, são necessários US\$ 29,15 milhões para manutenção dos trechos classificados como desgastados.

A pesquisa considerou as condições da superfície da pista principal do pavimento e do acostamento. E classificou o pavimento como regular, ruim ou péssimo em 59,8% da extensão avaliada no Amapá, enquanto que 40,2% foram considerados ótimo ou bom. 73,5% da extensão pesquisada apresentou a superfície do pavimento desgastada.

Pergunta-se então, por que não uma alternativa moderna e de baixo custo comparada ao asfalto?

Para Senço (2007), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas executadas sobre a superfície final da terraplanagem, como na Figura 1, com funções principais de resistir aos esforços provenientes do tráfego e do clima, propiciando aos usuários conforto, economia e segurança nas condições de rolamento com máxima qualidade e menor custo possíveis. A matéria prima de execução das camadas de corpo de aterro, subleito, reforço de subleito, sub base e base, é o solo.

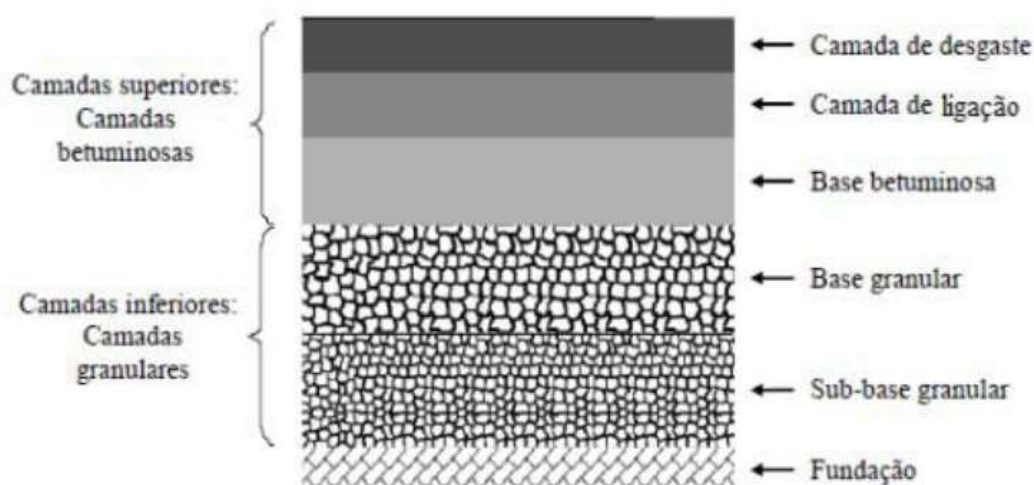


Figura 1 - Estruturação dos pavimentos flexíveis. Gabriel Silva, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-22-Constituicao-tipo-dum-pavimento-rodoviario-flexivel-adaptado-de-Silva-2005_fig1_230817387.

Diante da Globalização e a veracidade de que as matérias primas são finitas, também da exigência dos órgãos ambientais, faz-se essencial a busca por novos materiais e técnicas, para atender as necessidades da execução de um pavimento.

O solo é um material proveniente das rochas, decompostas por intemperismo. Para a engenharia de transportes, é um material encontrado na superfície terrestre para que possa ser escavado, muito utilizado na base das vias, segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, DNIT (2006). O solo também é muito utilizado em técnicas de pavimentação

devido a sua abundancia na superfície terrestre e também sua utilização tem baixo impacto a natureza.

Para o engenheiro civil e os profissionais da construção civil e de transportes, estudar solos é uma maneira de adequá-lo às obras civis, como suporte para sua construção, bem como as fundações, popularmente conhecida, mas também para o sustento de pavimentos rodoviários, tornando-o implicitamente importante economicamente e à segurança.

Antes da utilização do solo, é indispensável o conhecimento e a caracterização deste. Sua natureza e sua composição, bem como entender seu comportamento, e estudar suas propriedades físicas e mecânicas.

Ensaio realizados em laboratórios determinam propriedades do solo, como a composição granulométrica, massa volumétrica, limites de consistência, retração, teor de umidade e grau de compactação, e assim pode ser adequado para as situações necessárias, e se for o caso, corrigir sua composição, pois suas propriedades naturais nem sempre se adequam a do projeto. Pois, em toda obra de pavimentação, o solo deve atender as adequações mínimas de qualidade, requerendo tais estudos de caracterização sobre ele.

E justamente essas melhorias e/ou modificações do solo, para atender os requisitos do projeto, é o que chamamos de estabilização do solo.

Os estudos realizados devem atender aos requisitos elaborados pelo Departamento Nacional de Infra Estrutura de Transportes (DNIT, pág 146), dizendo que o Índice Suporte Califórnia (ISC) $\geq 2\%$, e expansão $\leq 2\%$, deverá ser o solo submetido, numa espessura mínima de 60 cm, ou estabilizado por processos químicos ou mecânicos. Segundo a NBR 9895 (1987), para cálculo do índice suporte Califórnia, deve-se adotar os maiores valores obtidos nas penetrações de 2,54mm e 50,8mm.

Para Marques (2006), “um solo estabilizado é aquele capaz de resistir e suportar as cargas e os esforços induzidos pelo trafego aplicado sobre o pavimento e também às ações erosivas de agentes naturais devido as condições mais diversas a serem consideradas.” Tem como objetivo melhorar as características dos solos de resistência mecânicas, como também garantir a permanência de tais melhorias no tempo de vida útil das obras de engenharia, de acordo com cada caso.

Uma adequada e estudada estabilização pode traduzir em reduções no tempo de execução das obras, praticando a industrialização do processo construtivo, propiciando uma economia considerável para o negócio.

O estabilizante químico de solo utilizado neste trabalho foi fornecido pela empresa Oxnix, que de acordo com a mesma é um aditivo químico de origem orgânica que impermeabiliza o solo, tornando-o estável e dando-lhe capacidade de suporte ao tráfego permanente. Para verificar a aplicação do aditivo Oxnix, algumas propriedades do solo natural e do solo aditivado serão analisados, por meio de ensaios físicos e mecânicos, a seguir: granulometria e Proctor.

O tipo escolhido deve-se levar em conta a disponibilidade técnica e econômica, e conhecer cada método, para assim aplica-lo melhor a situação desejada. Algumas técnicas tradicionais de engenharia se traduzem num considerado custo e impacto ambiental, como a exploração de jazidas, principalmente se ela for distante do local da obra, sendo neste caso, a estabilização uma técnica viável.

No caso do solo argiloso, utilizado nessa pesquisa, é um tipo propenso a mudanças em suas características, devido a umidade, perdendo resistência e invalido para rodovias, no seu estado natural. Logo, é imprescindível o uso de técnicas para a sua estabilização. Sendo escolhida levando em conta o oferecimento de maior qualidade e durabilidade.

Assim, faz-se necessário a pesquisa no solo de Macapá, no Amapá, para ser utilizado corretamente junto com o estabilizante químico Oxnix. Conhecendo tal, se caracteriza e se faz os ensaios necessários para a sua utilização, ou não, com o estabilizante para a base do pavimento. Muitas ruas e avenidas da cidade não possuem pavimento, na maioria das vezes por falta de recurso, e a estabilização pode ser uma boa alternativa econômica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa anseia analisar e estudar o comportamento físico-mecânico do solo natural localizado no Residencial Irmãos Platon na zona Oeste da cidade de Macapá, bem como este estabilizado com o uso do aditivo químico Oxnix, que pode lhe transmitir maior estabilidade e resistência para ser usado como base de pavimento.

1.2.2 Objetivo Específico

- Classificar o tipo de solo do Residencial Irmãos Platon, de onde será coletado o material, segundo Transplation Research Board (TRB);
- Realizar ensaios físicos e mecânicos do solo natural;
- Avaliar, através de ensaios, de acordo com o fabricante, se o aditivo químico estabilizante Oxnix é adequado a matéria prima dessa região;
- Analisar o solo estabilizado verificando se atende as especificações normativas para sua utilização em bases de pavimento.

1.3 JUSTIFICATIVA

No Brasil, o uso de solos modificados quimicamente tornou-se realidade a partir dos anos 40, com o crescimento da cidade de São Paulo. Atualmente em Macapá, esta alternativa ainda não é aplicada talvez por conta de desconhecimento técnico ou interesses políticos e financeiro.

Em qualquer lugar de implantação rodoviária, pode acontecer o imprevisto de o solo encontrado próximo ao local da obra não ser de características qualitativamente boas, se fazendo necessário a busca por alternativas para suprir tais deficiências, ou seja, o que se faria numa grande movimentação de matéria prima, com custo operacional elevado, poderá ser substituído pela estabilização desse material, gerando economia e produzindo bases de pavimento que atendam às exigências normativas.

Assim, é nítido que o uso dessa alternativa pode ajudar no custo e na logística de execução da obra. E nessa pesquisa será confeccionado justamente um solo estável quimicamente, em dosagens adequadas, para atender aos critérios normativos de ser usado como base de pavimento.

Diante disso, através desses resultados, essa pesquisa poderá contribuir com novas possibilidades de estabilização de solos com características semelhantes ao estudado, na cidade de Macapá, principalmente em obras que apresentarem solos com características semelhantes às do solo usado neste estudo, coletado na zona Oeste da Cidade.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado e dividido em 7 capítulos descritos a seguir:

- No Capítulo 1 - Introdução, apresenta-se uma visão geral, abordando alguns quesitos como história, situação atual, situação local e territorial.
- No Capítulo 2 – Referencial Teórico, conceitua-se as principais características dos solos e possíveis métodos de estabilização, bem como pavimentos e as informações sobre o aditivo químico Oxnix quais foram obtidas através da empresa.
- No Capítulo 3 - Metodologia, serão descritos os materiais e métodos que foram analisados e utilizados para caracterização e realização dos ensaios, juntamente à amostra de solo com o aditivo.
- No Capítulo 4 – Análise e Discussão dos Resultados, mostrar-se-ão os resultados, os quais serão discutidos, sobre a realização dos ensaios do solo com e sem aditivo.
- No Capítulo 5 - Conclusões, serão abordadas as considerações finais e conclusão sobre todo o trabalho e seu resultado. Também serão apresentadas algumas sugestões para futuras pesquisas.
- E por fim, as Referências, onde estará toda a base bibliográfica desta pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SOLO

O Solo, a matéria prima mais utilizada em termos de construção, desde os tempos mais antigos devido à necessidade humana, trabalhar com esse material, hoje muito utilizado em infraestrutura de construções, como fundações e bases de pavimento, é intrinsecamente necessário o conhecimento do seu comportamento e propriedade, analisando suas características para obter uma previsão de sua função junto as solicitações empregadas.

Segundo Caputo (1988), “Os solos são materiais que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química.”. Ele acrescenta que, mecanicamente, alguns fatores como água, temperatura, vegetação e vento,

formam os pedregulhos e areias, siltes e, em condições especiais, as argilas. Quimicamente, há modificação química ou mineralógica das rochas de origem. O principal causador é a água, provocando a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação.

Segundo Pinto (2006), “Todos os solos originam-se da decomposição das rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre”. Pinto afirma que a decomposição é derivada de agentes químicos e físicos, como a variação de temperatura, congelamento da água, bem como, quimicamente, a presença da fauna e da flora. O conjunto desses processos, leva a formação dos solos que são uma mistura de partículas pequenas que se diferenciam pelo tamanho e composição química.

2.1.1 Estrutura do Solo

O DNIT (2006) considera solo, geologicamente, como um material do resultado da decomposição das rochas, sendo essas modificadas pela ação do intemperismo. Mesmo que ultimamente tenham surgido novas ideias, tradicionalmente consideram-se os seguintes tipos principais para estruturação:

2.1.1.1 Estrutura granular simples: é característica das areias e pedregulhos, em que predominam as forças da gravidade na disposição das partículas, que se apoiam diretamente umas sobre as outras.

2.1.1.2 Estrutura alveolar: comumente nos siltes finos e em algumas areias, origina-se quando, na formação de um solo sedimentar, um grão cai sobre o sedimento já formado, e devido à predominância da atração molecular sobre o seu peso, ele ficará na posição do primeiro contato, ficando assim em forma de arcos.

2.1.1.3 Estrutura flocculenta: só é possível em solos cujas partículas componentes sejam todas muito pequenas. As partículas, ao se sedimentarem, formam-se em arcos, que também, formam outros arcos, como mostrado na Figura 2. É, na verdade, uma estrutura de ordem dupla.

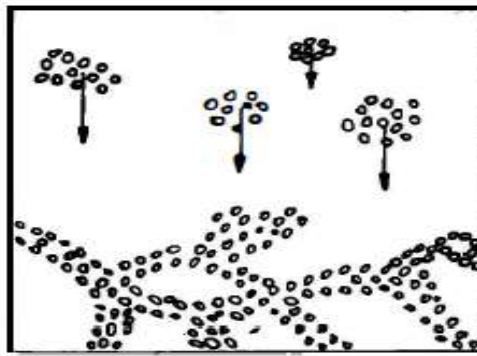


Figura 2 - Estrutura Flucolenta. Fonte: Caputo, 1988.

Desempenham uma função importante na sua formação: as ações elétricas que se desenvolvem entre as partículas, que são influenciadas pela natureza dos íons presentes no meio onde se processa a sedimentação.

2.1.1.4 Estrutura em esqueleto: nos solos onde, além de grãos finos, há grãos mais grossos, organizando-se em forma de esqueleto, cujos vazios são ocupados por uma estrutura de grãos mais finos. É o caso, apresentado na Figura 3, das estruturas das argilas marinhas.

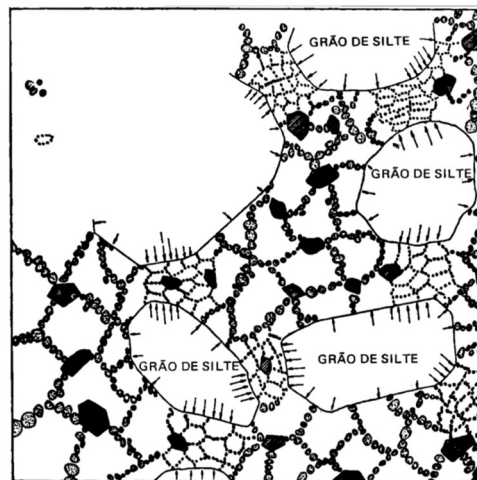


Figura 3 - Estrutura em Esqueleto. Fonte: Caputo, 1988.

2.2 ÍNDICES FÍSICOS

Para Caputo (1988), “O solo é um material constituído por um conjunto de partículas sólidas, deixando entre si vazios que poderão estar parcial ou totalmente preenchidos pela água”. Geralmente, é um agrupamento formado por três fases: sólida, líquida e gasosa. Como mostrado na Figura 4:

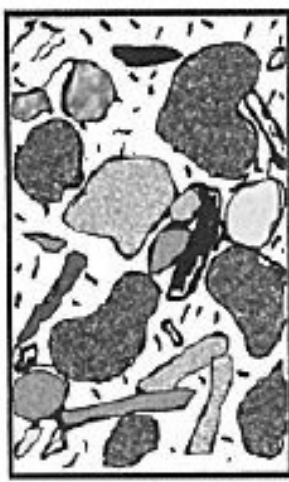


Figura 4 - Solo. Fonte: Pinto, 2006.

Os vazios são as partículas de ar. A fase sólida não sofre grande alteração. E mesmo que seja muito difícil separar os distintos estados em que a água se apresenta nos solos, é importante diferenciá-los.

- Água de constituição - faz parte da estrutura molecular da partícula sólida;
- Água adesiva ou adsorvida - é aquela película de água que envolve e adere fortemente a partícula sólida;
- Água livre - a que se encontra em uma determinada zona do terreno, enchendo todos os seus vazios;
- Água higroscópica - a que ainda se encontra em um solo seco ao ar livre;
- Água capilar - aquela que nos solos de grãos finos sobe pelos interstícios capilares deixados pelas partículas sólidas, além da superfície livre da água;
- As águas livres, higroscópica e capilar são as que podem ser totalmente evaporadas pelo efeito do calor, a uma temperatura maior que 100°C.

Quanto à fase gasosa, que preenche os vazios das demais fases, é constituída por ar, vapor d'água e carbono combinado. A sua consideração é de interesse em certos casos especiais de consolidação de aterros, quando então há necessidade de calcular as "pressões neutras" desenvolvidas em função da redução de volume da fase gasosa.

Caputo Caputo (1988) afirma que os índices são de importância no estudo das propriedades dos solos, pois elas dependem dos seus constituintes e das proporções relativas entre eles, assim como da interação de uma fase sobre as outras.

Definições segundo Pinto (2006):

Umidade (w): seria a relação do peso da água mantida num volume de solo úmido e o peso seco. Variam entre 10 e 40%.

Índice de vazios (e): proporção do volume de vazios e o volume das partículas sólidas. Para ser calculado, precisa dos outros índices. Geralmente varia entre 0,5 e 1,5.

Porosidade: (η): relação do volume de vazios e o volume total da amostra de solo. Dada em porcentagem, geralmente entre 30 e 70%.

Grau de Saturação (S): razão do volume de água e o volume de vazios. Quanto mais próximo de 0%, está para solo seco, e mais próximo de 100%, solo saturado.

Peso Específico Natural (γ_n): relação do peso total do solo e seu volume total. Em questão de compactação, o termo usado é peso específico úmido.

Peso Específico Aparente Seco (γ_d): razão do peso dos sólidos sobre o volume total. Isso seria o peso específico do solo, caso fosse seco. Depende do peso específico natural e da umidade. Varia entre 13 e 19 kN/m³.

Peso Específico Aparente Saturado (γ_{sat}): seria o peso específico do solo se ele fosse saturado sem variação de volume. Pouca aplicação prática. Da ordem de 20 kN/m³.

Peso Específico Aparente Submerso (γ_{sub}): usa-se para determinar tensões efetivas, representa o peso específico efetivo do solo submerso. Da ordem de 10 kN/m³.

Grau de Compacidade (CR): o situação natural de um solo granular (areia, pedregulho) define-se pelo grau de compacidade ou densidade relativa.

Consistência ou Estado das Argilas: indicado pela resistência que ela apresenta, como indicado na Tabela 1, e pode ser quantificada por meio de um ensaio de Compressão Simples.

Tabela 1 - Consistência em função da Resistência à compressão

Consistência	Resistência (Kpa)
Muito mole	< 25
Mole	25 a 50
Média	50 a 100
Rija	100 a 200
Muito rija	200 a 400
Dura	> 400

Modificada pelo autor.

2.3 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE SOLO – Plasticidade e Consistência:

A plasticidade, uma importantíssima propriedade das argilas, consiste na maior ou menor capacidade dos solos serem moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume, Caputo (1988). O comportamento plástico dos materiais se baseia nas características tensão-deformação. O corpo é elástico quando recupera a forma e o volume genuínos, sendo acabadas as forças externas que o deformava; E é plástico quando, cessadas as forças externas, não volta ao seu estado original. A Figura 5 mostra o esquema dos estados de consistência, e os limites de consistência. Ao decorrer que o teor de umidade diminui, apresentam-se:

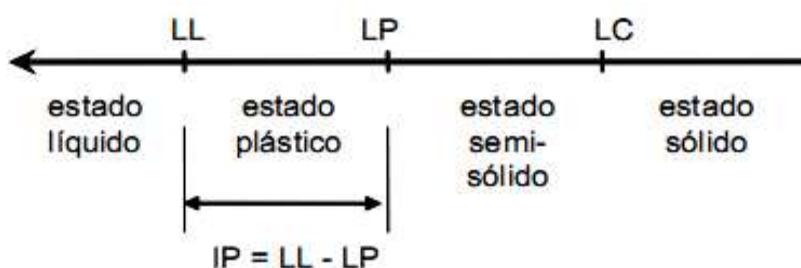


Figura 5 - Limites de Consistência. Fonte: Caputo, 1988. Modificada pelo autor.

Os dois primeiros limites (LL e LP) são devidos ao cientista Atterberg (1911) e o último (LC) a Haines.

2.3.1 Limite de Liquidez (LL):

O limite de liquidez (LL) é determinado pelo aparelho de Casagrande, conforme a Figura 6, designado por um prato de latão, no formato de concha, sobre um suporte de ebonite¹; por meio de um excêntrico imprime-se ao prato, repetidamente, quedas de altura de 1 cm e intensidade constante. No Brasil, esse ensaio é padronizado pela NBR 6459 (1984).

¹ **Ebonite** é uma resina sintética de natureza plástica, como o PVC, o polietileno e o PET, rica em enxofre (aproximadamente 20 a 30% da sua composição).

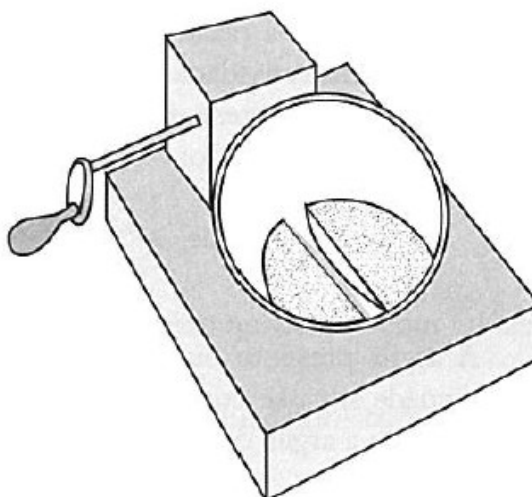


Figura 6 - Aparelho de Casagrande. Fonte: Pinto, 2006.

2.3.2 Limite de Plasticidade (LP):

O limite de plasticidade tem como determinação o cálculo da porcentagem de umidade para a quando o solo começa a se “quebrar” quando se tenta modelar, com ele, um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento, conforme a Figura 7.

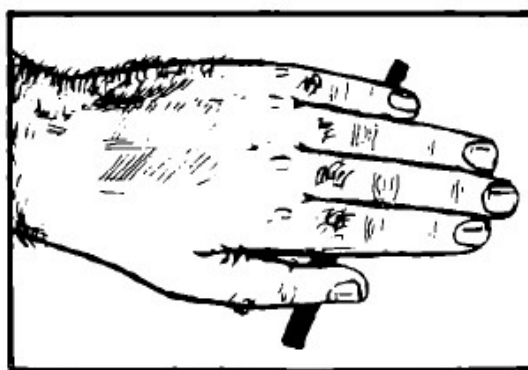


Figura 7 - Limite de Plasticidade. Fonte: Caputo, 1988.

Ainda não foi possível, ao contrário do LL, mecanizar satisfatoriamente esse ensaio. No Brasil, ele é padronizado pela NBR 7180/1984.

2.3.3 Índice de Plasticidade (IP):

É o resultado da subtração do limite de liquidez e o limite de plasticidade ($IP = LL - LP$).

Define a zona na qual o terreno se manifesta no estado plástico e, por ser máximo para as argilas e mínimo para as areias, oferece um critério para caracterizar o estado argiloso de um solo. Sendo que, quanto maior o IP, mais plasticidade terá o solo.

2.3.4 Granulometria

Segundo Caputo (1988), os solos são denominados de acordo com as dimensões de suas partículas. E para a ABNT, de acordo com a escala granulométrica a ver:

- Pedregulho: conjunto de partículas de dimensões (diâmetros equivalentes) estão entre 76 e 4,8 mm;
- Areia: entre 4,8 e 0,05 mm;
- Silte: entre 0,05 e 0,005 mm;
- Argila: menores que 0,005 mm.

Tais valores estão especificados na norma NBR 7181.

Para Pinto (2006), as partículas do solo são de tamanhos diversos, não sendo fácil identifica-los pelo simples manuseio do solo. Exemplifica que, um grão de areia pode estar envolvido por uma grande quantidade de partículas argilosas, muito finas, estando no mesmo aspecto de uma aglomeração formada por uma grande quantidade delas, e possuem variações quando estão secas ou úmidas.

Ele denomina especificamente as partículas para diversas faixas de tamanho de grãos, e que os limites variam de acordo com o sistema de classificação. Os valores expostos na *Tabela 2* estão de acordo com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Tabela 2 - Limites das Frações de Solo pelo tamanho dos grãos

Fração	Limites definidos pela ABNT
Matacão	De 25cm a 1m
Pedra	De 7,6cm a 25cm
Pedregulho	De 4,8mm a 7,6cm
Areia grossa	De 2mm a 4,8mm
Areia Média	De 0,42mm a 2mm
Areia Fina	De 0,05mm a 0,42mm
Silte	De 0,05mm a 0,5mm
Argila	Inferior a 0,05mm

2.3.5 Ensaio Proctor

Segundo Caputo (1988), é o ensaio original para determinar a umidade ótima e o peso específico máximo de um solo. Consiste em compactar uma amostra dentro de um recipiente cilíndrico, de aproximadamente 1000cm³, em três camadas sucessivas, sob a ação de 25 golpes de um soquete, caindo de 30cm de altura. Este ensaio é repetido em diferentes teores de umidade e para cada um determina-se o peso específico aparente. Tendo os valores, traça-se a curva de saturação, obtendo-se os números de umidade ótima e densidade do solo seco máxima.

Para traçar a curva precisa-se determinar cinco pontos, fazendo que dois desses se encontrem na zona seca, um próximo à umidade ótima e os outros na zona úmida.

Para Pinto (2006), A amostra de solo deve ser previamente seca e destorroada. O ensaio deve ser iniciado acrescentando água até que o solo fique com 5% de umidade inferior a umidade ótima. Com a umidade uniformizada, uma porção de solo é colocada num cilindro padrão (10cm de diâmetro, altura de 12,73cm, volume de 1000cm³) e submetida a 26 golpes de um soquete de massa de 2,5 kg, e caindo de 30,5 cm. Pinto explica que antes eram 25 golpes, e está em 26 para ajustar a energia de compactação ao valor de outras normas internacionais, considerando que as dimensões do cilindro padronizado no Brasil são diferentes das demais.

A parte do solo compactado deve ocupar algo perto de um terço do cilindro. Este processo é repetido mais duas vezes, atingindo uma altura um pouco superior a do cilindro, que

é possível por um anel complementar. Alinha-se o volume raspando os excessos. Assim determina-se a massa específica do corpo de prova e com a mostra interna, a umidade.

Segundo Pinto (2006), os valores típicos para solos argilosos que apresentam densidades secas baixas e umidade ótima elevada, possuem valores de tais como 25 a 30% de umidade ótima correspondendo a 1,5 a 1,4 kg/dm³ de densidades secas máximas e são comuns em argilas.

Solos siltosos também possuem valores baixos de densidade secas máximas elevadas, em torno de 2 a 2,1 kg/dm³ e umidades ótimas aparentemente baixas, na ordem de 9 a 10%, representadas por areias e pedregulhos bem graduados, como na Figura 8. Areias finas argilosas lateríticas podem apresentar umidade ótima de 12 a 14%, com densidades secas máximas de 1,9 kg/dm³.

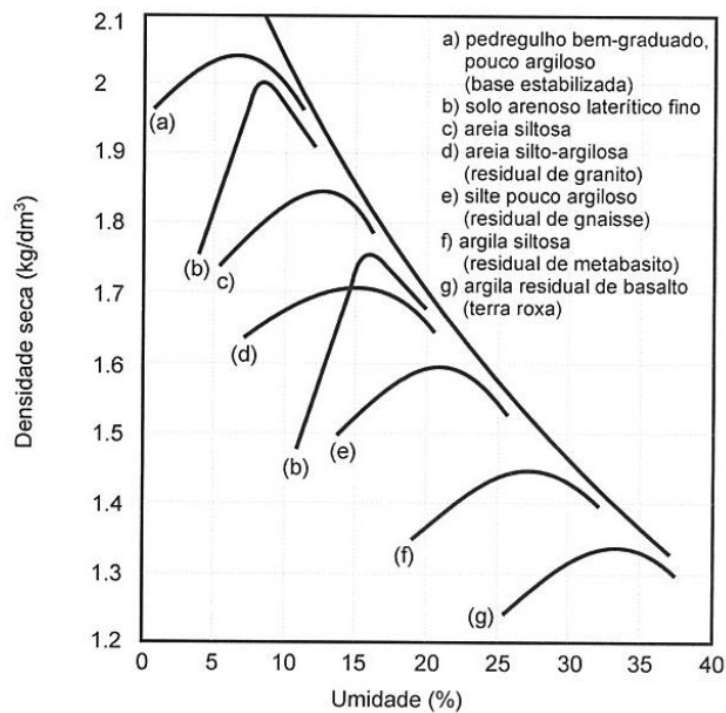


Figura 8 - Curvas de Compactação de Diversos solos brasileiros. Fonte: Pinto, 2006, página 80.

2.3.6 Ensaio Califórnia

Para Caputo (1988), é de grande valor na técnica rodoviária e também base do conhecido método de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

No ensaio de Expansão, a expansão do material é feita moldando-se o corpo de prova, com a umidade ótima. Sobre a amostra, é colocado um papel de filtro e acima dele um disco perfurado, com uma haste ajustável, com uma sobrecarga de discos anulares que não deve ser inferior a 4,5kg. Depois, imerge-se o cilindro com a amostra compactada, junto com o disco e a sobrecarga dentro de um recipiente com água, durante 4 dias.

Em cima da haste é colocado um extensômetro, montado em tripé e ajusta-se a leitura. A cada 24 horas, durante os 4 dias, é feita a leitura nos extensômetros, conseguindo observar a expansão do material. As expansões progressivas, assim como a expansão total ao fim de 4 dias, são referidas em porcentagem da altura inicial do corpo de prova.

Para subleitos bons, é considerado que tenham expansões menores que 3% e que os materiais para as sub-bases tenham valores inferiores a 2% e para bases, menores que 1%.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Com base em tudo já citado relacionado aos solos, nota-se a grandiosa diversidade dos mesmos, dificultando sua caracterização nas diferentes regiões, logo viu-se a necessidade da criação dos sistemas de classificação, mostrando a semelhança de tais características geotécnicas para cada grupo de solos.

A classificação é feita em cima de algum motivo, seja a origem dos solos, a textura, observação e manuseio, pedologia² e também critérios geotécnicos do solo.

Segundo Caputo (1988), os dois principais são: o Sistema Unificado de Classificação (Unified Classification System - U. S. C.), idealizado por A. Casagrande; e a Classificação do H.R.B. (Highway Research Board), originária da classificação do Public Roads Administration.

² **Pedologia**, do grego *pedon* (solo, terra), é o nome dado ao estudo dos solos no seu ambiente natural. Ela estuda a pedogênese, a morfologia e a classificação de solos.

2.4.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos

Segundo Pinto (2006), nesse sistema, todos os solos são classificados pelo conjunto de duas letras, as cinco letras acima indicam o tipo principal do solo, e as abaixo indicam aos dados complementares do solo. Então, SW significa a “Areia bem graduada”, conforme a Tabela 3:

Tabela 3 - Terminologia do sistema Unificado

G	Pedregulho
S	Areia
M	Silte
C	Argila
O	Solo orgânico
W	Bem graduado
P	Mal graduado
H	Alta compressibilidade
L	Baixa compressibilidade
Pt	Turfas

Para Caputo (1988), geralmente os solos são classificados em três grupos grandes:

- Solos grossos – os grãos que, em sua maioria, tem diâmetro maior que 0,074 mm (mais da metade do peso dos grãos são retidos na peneira nº 200).

- Solos finos – os grãos que, em sua maioria, tem diâmetro menor que 0,074 mm.

- Turfas - altamente orgânicos e absurdamente compressíveis, também fibrilares.

No primeiro grupo estão os pedregulhos, areias e solos com poucas quantidades de materiais finos, como silte e argila. Estes solos são designados da seguinte maneira:

- Pedregulhos ou solos pedregulhosos: GW, GC, GP e GM

- Areias ou solos arenosos: SW, SC, SP e SM

No segundo grupo, tem-se solos mais finos de baixa ou alta compressibilidade. São designados a seguir:

- Solos de baixa compressibilidade: ML, CL e OL

- Solos de alta compressibilidade: MH, CH e OH

E por último, temos solos de regiões pantanosas e com alta taxa de decomposição vegetal acumulada. Representam-se pelo símbolo Pt de peat (turfa). Todas esquematizadas conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Sistema de Classificação de Solos

SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (U. S. C.)		
Classificação Geral	Tipos Principais	Símbolos
Solos Grossos (menos que 50% passados na # 200)	Pedregulhos ou solo pedregulhosos	GW, GP, GM E GC
	Areia ou solos arenosos	SW, SP, SM E SC
Solos Finos (mais que 50% passando na #200)	Siltosos ou argilosos	Baixa compressibilidade (LL<50) ML, CL e OL
		Alta compressibilidade (LL >50) MH, CH e OH
Solos altamente orgânicos	Turfas	Pt

Fonte: Caputo, 1988.

2.4.2 Sistema de Classificação HRB/TRB

Segundo essa classificação, os solos são conjuntados em grupos e subgrupos seguindo os resultados de alguns ensaios, como: Granulometria por Peneiramento; Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, bem como o índice IG, (Eq. 1), sendo um número inteiro que varia de 0 a 20, tendo função função de determinar a capacidade de suporte do terreno, em que 0 indica um excelente solo para a fundação de um pavimento e 20, um material muito ruim.

$$IG = 0,2 \times a + 0,005 \times a \times c + 0,01 \times b \times d$$

(Eq. 1)

Onde:

a = % do material atravessado na peneira de nº 200, menos 35; se a % for >75, adota-se a = 40; e se a % seja < 35, adota-se a = 0;

b = % do material atravessado na peneira de nº 200, menos 15; se a % for >55, adota-se b = 40; e se a % seja < 15, adota-se b = 0;

c = valor de limite de liquidez (LL) menos 40; se o LL > 60%, adota-se c = 20; se o LL < 40%, adota-se c = 0;

d = valor de índice de plasticidade (IP) menos 10; se o IP > 30%, adota-se d = 20; se o IP < 10%, adota-se d = 0;

Os valores de "a", "b", "c" e "d" devem ser colocados em números inteiros e positivos, assim como o valor de IG.

Pinto (2006) afirma que este sistema é muito empregado em Engenharia rodoviária em todo mundo, sendo que nele se inicia a classificação pela constatação da porcentagem do material atravessado na peneira nº 200, mas são considerados solos de graduação grossa os que possuem menos de 35% atravessados nessa peneira, que são os solos do grupo A-1, A-2, A-3. Os solos com mais de 35%, são dos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7.

Os solos grossos são subdivididos em:

- A-1-a: Solos grossos, com menos de 50% passando na peneira nº 10 (2mm), menos que 30% atravessando na peneira nº 40 (0,42mm) e menos de 15% atravessando na peneira nº 200. O IP dos finos deve ser menor que 6. Corresponde aos pedregulhos bem graduados.

- A-1-b: Solos Grossos, com menos de 50% passando na peneira nº40 e menos que 25% na peneira nº200, também com IP menor que 6. Corresponde à areia bem graduada.

- A-3: Areias Finas, com mais de 50% passando na peneira nº 40 e menos de 10% passando na de nº200. São areias finas mal graduadas.

- A-2: São areias em que os finos presentes tem características secundárias. São subdivididos em A-2-4, A-2-5, A-2-6 e A-2-7, devido aos índices de consistência.

Algumas Notas:

- P10, P40, e P200, indicam respectivamente, as porcentagens que passam nas peneiras números 10 (2mm), 40 (0,42mm) e 200 (0,74mm);

- A identificação é feita da esquerda para a direita, por isso que A-3 é colocado antes de A-2, sem que isso signifique superioridade daquele sobre este;

- LL – Limite de Liquidez;

Todas essas configurações estão esquematizadas conforme a *Tabela 5*, a seguir:

Tabela 5 - Classificação dos Solos H.R.B

Classif. Geral	Solos Granulares (P200<35%)							Solos Silto-argilosos (P200>35%)			
Grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Sub-grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5; A-7-6
P10	<50										
P40	<30	<50	<50								
P200	<15	<25	<10	<35	<35	<35	<35	>35	>35	>35	>35
LL				<40	>40	<40	>40	<40	>40	<40	>40
Tipos de Material	Fragmentos de Pedra, pedregulho e areia		Areia fina	Pedregulhos e areia siltosas ou argilosas				Solos Siltosos		Solos Argilosos	
Classif. como subleito	Excelente a bom						Regular a mau				

Fonte: Caputo, 1988. Adaptada pelo autor.

2.5 Pavimentos

Segundo Liedt Bariani Bernucci (2010), “Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.” Normalmente, o pavimento rodoviário se classifica em dois tipos básicos: *rígidos* e *flexíveis*.

Para Senço (2007), Pavimentos rígidos são aqueles que pouco deformam, principalmente elaborados por concreto de cimento. Quando estão sujeitos a deformações são rompidos por tração na flexão.

Já os Pavimentos flexíveis são aqueles que, aplicadas as deformações, até um certo limite, estas não os rompem. Geralmente são dimensionados a compressão e a tração na flexão,

estimulada pela geração das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, levando a estrutura ao rompimento por fadiga e a deformações permanentes.

Já segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT, 2006), os pavimentos são denominados e em rígidos, semirrígidos e flexíveis:

- Rígidos: o qual o revestimento tem uma elevada rigidez em relação as camadas inferiores e, assim, absorve quase todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.
- Semirrígidos: caracterizado por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias, por exemplo.
- Flexível: o que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e assim a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

O solo estudado nessa pesquisa se encaixa para fins de pavimentos flexíveis.

2.5.1 Bases de Pavimento

A base do pavimento é uma camada da estrutura feita sobre a sub-base (a qual deve ser executada quando não for recomendado fazer a base exatamente em cima do o leito) ou sobre o subleito devidamente regularizado e compactado.

Obrigatoriamente, deve resistir aos esforços advindos dos veículos, e distribui-los à sua camada inferior. O revestimento asfáltico será executado sobre esta camada.

Geralmente, as bases podem ser organizadas a seguir, segundo Senço (2007):

- Bases rígidas:
 - a) Concreto de Cimento: é uma mistura comumente dosada e uniformizada de agregados, areia, cimento e água, atendendo ao projeto;
 - b) Macadame de cimento: é uma base construída com agregado graúdo (entre 50mm e 90mm), cujos vazios são preenchidos por grãos menores, misturado cm cimento para garantir uma razoável ligação entre elas.
 - c) Solo Cimento: é uma mistura do solo escolhido, cimento e água, com proporções atendendo o projeto, que sendo uniformizadas e compactadas, atendem as condições para funcionar como base de pavimento.

▪ Bases Flexíveis:

- a) Solo estabilizado: camada feita com solo, que atende determinadas especificações (granulometria, limite de liquidez, e índice de plasticidade), em que sua estabilização pode ser conseguida de forma natural ou artificial.
- b) Macadame hidráulico: a palavra "macadame" é uma homenagem ao engenheiro John McAdam, que substituiu os trabalhos de assentamento de pedras pela construção de camadas de agregados devidamente comprimidas. O macadame hidráulico é uma variante do macadame original. É uma base ou sub-base feita de uma ou mais camadas de pedra britada, de fragmentos entrosados entre si e material de enchimento.
- c) Base de brita graduada: É o resultado da mistura, feita em usinas de agregado previamente dosado, tendo também material de enchimento, água e eventualmente, cimento.
- d) Base de macadame betuminoso: Consiste na superposição de camadas de agregados interligadas por pinturas de material betuminoso. Também chamada de base negra, o número de camadas depende da espessura estabelecida em projeto. Os agregados utilizados possuem granulometria correspondente a uma relação de diâmetro de baixo para cima, podendo, inclusive, chegar ao nível final superior com granulometria própria de camada de revestimento.
- e) Base de Paralelepípedo e Alvenaria Poliédrica (por aproveitamento): correspondem a leitos de estradas antigas que, com a maior velocidade atingida pelos veículos, deixaram de possuir interesse, por provocarem principalmente a trepidação e a alta sonoridade. Esses revestimentos antigos passam a ser recapeados com misturas betuminosas, por isso a inclusão dessas camadas entre as bases flexíveis, por aproveitamento.

A seguir, conforme a *Tabela 6*, estão esquematizadas as Terminologias descritas.

Tabela 6 - Terminologia das bases de pavimento

Terminologia as Bases			
Bases	Rígidas	Concreto de Cimento	
		Macadame de cimento	
		Solo-Cimento	
	Flexíveis	Solo estabilizado	Granulometricamente
			Solo- betume; Solo-cal
			Solo-brita
		Macadame Hidráulico	
		Brita graduada com ou sem cimento	
		Macadame betuminoso	
		Alvenaria poliédrica	Por aproveitamento
		Paralelepípedos	

Algumas especificações são apresentadas por órgãos monitoradores como o DNIT, informando que os solos deverão possuir tais critérios para poderem ser utilizados como base de um pavimento.

Para o DNIT, os valores de expansão a qual um solo deve obter para atender aos critérios de base deverá ser menor ou igual a 0,5%, e o CBR do mesmo material deve atingir valores maiores a 80%.

Assim, espera-se que os solos naturais sozinhos não alcancem valores altos de CBR, logo se vê a necessidade de acrescentar aditivos ao solo, caso ele tenha finalidade de ser utilizado como base. Se possuir um valor alto, este tem que ser estudado para uma estabilização de solo cimento.

2.6 ESTABILIZAÇÃO DE SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO

Assim como diversas obras de engenharia, a pavimentação usa diretamente o solo para diferentes camadas de sua estrutura. Melhorando o aproveitamento econômico e de progresso da obra. Logicamente, o ideal seria utilizar o solo que já existe no local da obra. Porém, as vezes estes não atendem aos critérios mínimos exigidos para serem utilizados. Diante disso, viu-se a necessidade de criar um método alternativo para o solo ser aproveitado, no caso, a estabilização dele.

Para Senço (2007), a Base de solo firmado é uma camada construída com solo atendendo determinadas especificações como a granulometria, limite de liquidez e índice de plasticidade (que pode ser conseguida de forma natural ou artificial).

Ainda afirma que, estabilizar um solo é dar a ele capacidade para resistir a deformações e ruptura durante o tempo em que ele deva atender tais critérios para cumprir sua função. E para ele, as características fundamentais de um solo estabilizado é resistência ao cisalhamento e à deformação, pois resistirão sem se romper quando sujeitos a tensões.

Existem três principais métodos para a estabilização: mecânico, granulométrico e o químico.

2.6.1 Estabilização Mecânica

Esse método é baseado no aprimoramento da granulometria do solo, a partir de processos de compactação, pois este é um jeito de dar ao solo, também, um melhor valor de densidade e umidade ótima. É comumente usado numa obra, na execução das diferentes camadas de um pavimento e complementa diversos métodos de estabilização.

Segundo Marques (2006), a Estabilização Mecânica objetiva dar ao solo (ou mistura de solos), que será usado como camada do pavimento, um estado de densificação máxima tendo em vista a energia de compactação e a uma umidade ótima. Chamada também estabilização por compactação. Complementando outros métodos de estabilização, é um método muito utilizado na efetuação das camadas do pavimento.

2.6.2 Estabilização Granulométrica

Obtida pelo acréscimo ou remoção de partículas do solo, objetiva modificar as propriedades deste. Consiste, basicamente, acrescentando-se um material no conjunto de dois ou mais materiais, para atenderem uma determinada faixa granulométrica segundo os critérios normativos. Quando a granulometria ideal é conseguida por meio da adição de pedra britada para suprir a ausência de material graúdo, a camada recebe o nome de solo brita.

Marques (2006) define como uma alteração das propriedades dos solos por meio da soma ou remoção de partículas de solo. Basicamente, o método se define no uso de um insumo ou na mistura de dois ou mais insumos, para que se encaixem no padrão de uma tal especificação.

2.6.3 Estabilização Química

Objetiva o melhor desempenho das propriedades físicas e mecânicas do solo, alterando sua estrutura e aumentando sua resistência aos esforços solicitantes com o uso de aditivos que podem ser os mais variados. A exemplo de aditivos para estabilização química, tem-se: cimento, cal, produtos industrializados como o CON-AID®, e Oxnix, que será o utilizado nesta pesquisa etc.

Para Marques (2006), a estabilização química pode ser usada de maneira diferente em solos não coesivos e coesivos. Solos não coesivos compreendem-se os compostos de pedras, pedregulhos, cascalhos e areias, ou seja, de partículas grandes (grossas). Estas misturas, compostas por muitas partículas, individualmente soltas, que no estado seco não se aderem uma à outra (somente se apoiam entre si), são altamente permeáveis. Isso acontece pois existem, entre as partículas, espaços vazios relativamente grandes e intercomunicados entre si.

Já os solos Coesivos, individualmente, são grãos muito finos, se aderem firmemente um ao outro e não podem ser reconhecidos a olho nu. Os espaços vazios entre as partículas são muito pequenos. Devido à sua estrutura estes solos apresentam resistência à penetração de água, absorvendo-a muito lentamente. Porém, se a água conseguir penetrar no solo, também encontra dificuldade para ser extraída do interior do mesmo. Ao receber água, tendem a tornar-se plásticos (surge a “lama”). Apresentam maior grau de estabilidade quando secos.

Quando utilizada para solos granulares, tem por objetivo principal melhorar sua resistência ao cisalhamento (causado pelo atrito produzido pelos contatos das superfícies das partículas) através da adição de poucas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Os ligantes mais utilizados são o Cimento Portland, Cal, Pozolanas, materiais betuminosos, resinas, etc.

Nos solos argilosos (coesivos), encontra-se estruturas floculadas e dispersas que são mais sensíveis a presença de água, interferindo na resistência ao cisalhamento. A adição de

agentes químicos é comum para que provoquem a dispersão ou floculação das partículas ou uma substituição prévia de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidrorrepelentes seguida de uma adição de cimentos.

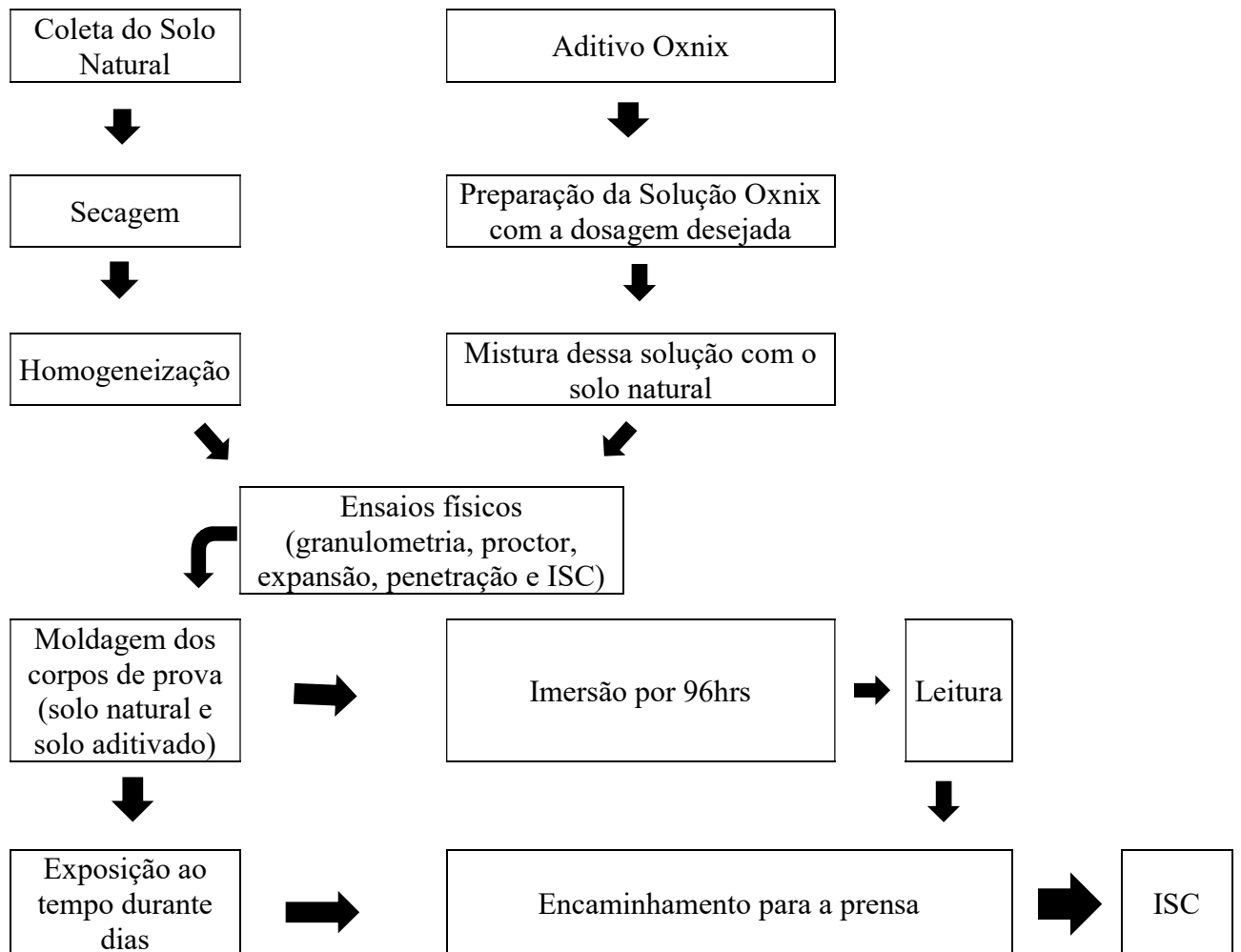
2.7 ADITIVO QUÍMICO ESTABILIZANTE DE SOLO: Oxnix

OXNIX é um aditivo químico de origem orgânica que impermeabiliza o solo, tornando-o estável e dando-lhe capacidade de suporte ao tráfego permanente, sendo resultado da mais avançada tecnologia em estabilizantes químicos de solo. É um composto organometálico alcalino derivado de hidrocarboneto saturado de cadeia média, apresentado na forma de pó, solúvel em água e de caráter não iônico.

Atuando sobre as partículas finas do solo, OXNIX aumenta sua capacidade de suporte para absorver cargas do tráfego, reduz sua expansão e sucção, dispensando a pedra e outros agregados no processo de pavimentação. Essas características fazem do OXNIX o estabilizante de solos ideal para base, sub-base e reforço de subleito de rodovias, ruas, avenidas, aeroportos, pátios de descarga e etc. Um saco do produto rende até 500 m² de aplicação.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os métodos utilizados na pesquisa. E resumidamente, o esquema a seguir mostra uma prévia do cronograma de execução de ensaios:



3.1 MATERIAIS

Serão utilizados os seguintes materiais para a realização da caracterização do solo, e a sua resistência aliado ao aditivo Oxnix. Segundo o fabricante, necessita-se:

- Solo Coletado in situ;
- Aditivo Oxnix;

- Reagente (Cal Hidratada ou Cimento ou Sulfato de Alumínio);
- Água suficiente para deixar o solo com umidade ideal para compactação.

O solo foi coletado na região Oeste da Cidade de Macapá, especificamente dentro da área localizada dentro do Residencial Irmãos Platon, conforme a Figura 10, cujo em algumas ruas está sendo efetuada sua pavimentação.

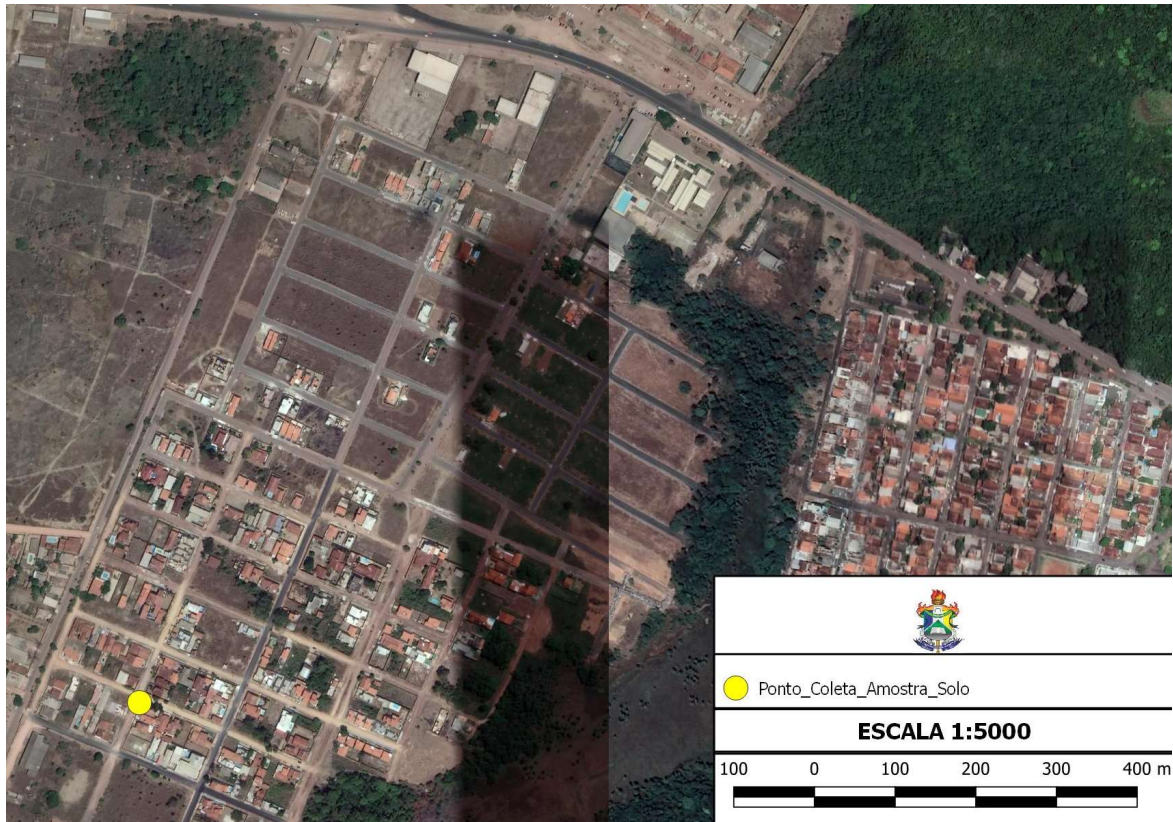


Figura 10 - Ponto de Coleta do solo Natural, pontuado com coordenadas geográficas do local. Fonte: Google Earth

Do ponto de coleta, foi-se extraído o material natural, conforme a Figura 11:



Figura 11 - Solo Extraído do Residencial.

Segundo a Revista Deconcic (Brito, 2017), a Cal Hidratada, mostrada na Figura 12, é bastante eficiente para garantir uma capacidade de suporte (ISC) bastante elevada, para estradas e locais que vão ter um tráfego de veículos pesados. A adição da cal no solo pode trazer alguns efeitos como a modificação da granulometria do solo, devido à ocorrência de floculação; aumento do limite de plasticidade (LP) e redução do limite de liquidez (LL); diminuição das variações de volume dos solos expansivos; redução da densidade e maior do teor de umidade; além do aumento da resistência à compressão simples.



Figura 12 - Cal fornecida em sacos de 50 kg. Fonte: Empresa Oxnix.

3.2 ENSAIO

Aqui será apresentado como os equipamentos foram utilizados para a manuseio dos materiais relacionados na pesquisa e aquisição de resultados, bem como os ensaios e processos que serão necessários para a conclusão do trabalho.

O que é necessário para estabilizar o solo com este processo: fazer análise em laboratório do solo que se pretende estabilizar, para obter todos os dados deste solo, principalmente a sua granulometria (quais as quantidades de argila, areia, silte, etc, existentes) para dar a orientação correta para aplicação do Estabilizante, bem como o ponto da umidade ótima para a compactação, além de outros testes (ensaio de proctor, compactação, expansão, penetração). É necessário que o solo do local da aplicação tenha um mínimo de 30% de argila na sua composição para que a reação com o reagente e o estabilizante ocorra, segundo o fabricante.

Observação 1: se o solo analisado contemplar uma quantidade muito pequena de argila, deve-se trazer de alguma jazida de argila quantidade necessária para pelo menos ter o mínimo necessário para que o resultado seja satisfatório;

Observação 2: se o solo analisado for 100 % argila, deve-se acrescentar uma quantidade de areia e agregados finos, pois a argila pura fica muito plástica e não dá compactação;

O ideal é que se tenha 50% de argila 50% de areia e agregados finos.

A seguir, conforme a Tabela 7, apresenta-se os ensaios realizados em laboratório, seguidos das normas pelas quais eles foram baseados.

Tabela 7 - Normas referente aos ensaios

Normas	
Ensaio	Norma referente
Granulometria por peneiramento	DNER – ME 080/94
Compactação de solos	DNER – ME 162/94
Ensaio de determinação de Expansibilidade	DNIT 160/2012 - ME
Ensaio de Determinação de Penetração	DNIT 155/2010 - ME
Determinação de Índice Suporte Califórnia	DNIT 172/2016 - ME

Fonte: Autor.

De acordo a empresa Copra, fabricante do aditivo Oxnix, os procedimentos podem ser feitos com dois reagentes: sulfato de alumínio ou cal hidratada. Na pesquisa foi manuseado o segundo reagente e o processo foi realizado nas dependências do laboratório da empresa que forneceu o Aditivo.

A amostra de solo foi coletada do local segundo as exigências da empresa, retirando cerca de 5 cm da superfície e cavando 30cm de profundidade. Foram coletados 30kg de solo in situ, colocados em baldes e transportados para Sumaré, em São Paulo, onde fica o laboratório da empresa.

3.2.1 Laboratório

3.2.1.1 Procedimento para o ensaio de compactação Oxnix com reagente Cal Hidratada

3.2.1.1.1 Preparo da Solução Oxnix, segundo o fabricante

Quantidades para 1 litro de solução (0,001 m³) de terra:

- Aditivo Oxnix: 0,33 g.
- Cal hidratada calcítica 46 g.
- Coloque a água em um Becker, com temperatura de 25° e acrescente o OXNIX,

misturando até sua total homogeneização.

A Figura 13, a seguir, mostra o aditivo químico em sacos de 20kg.



Figura 13 - Aditivo químico Oxnix na embalagem

Procedimento determinado pelo fabricante:

Determinado a quantidade de água para atingir a umidade ótima da amostra do solo, deduza a quantidade da solução Oxnix na água e acrescente a solução Oxnix.

Exemplo: Quantidade de Água para atingir a umidade ótima: 800 ml.

- Deixe com 740 ml de água, e acrescentar 60ml da solução de Oxnix.

Homogeneíze bem.

- Na amostra do solo (6.000 g) acrescente a reagente CAL, misture bem, deixando a amostra e o cal bem homogeneizado.

- Acrescente a água contendo a solução OXNIX.

- Misture bem a amostra do solo, para que ela fique bem homogeneizada.

Proceder normalmente com a compactação e aguardar o tempo de cura de 48 horas para continuidade do ensaio, conforme as norma NBR 7182/86.

Para saber se a mistura do solo está na umidade ótima: Depois de misturar o reagente cal e a solução de Oxnix no solo, verificar se a mistura está bem homogeneizada pegar um pouco de terra e apertar bem na mão, se a amostra ficar com uma aparência de um “quibe” firme isso indica que a amostra se encontra na umidade ótima.

A seguir, na Figura 14, mostra-se os corpos de prova feitos para os ensaios, sendo que o mais acima é do solo natural, e o abaixo é com solo estabilizado com Oxnix e Cal.



Figura 14 - Corpos de prova. Preparados segundo a NBR 9895.

3.3.1.1.2 Granulometria por Peneiramento

Primeiramente, as amostras deste ensaio devem seguir as recomendações da DNER – ME 080/94. O ensaio foi iniciado passando o material na peneira de 2,0mm. A parte grossa do material retido foi lavado para que todas as partículas finas fossem retiradas. Este mesmo procedimento foi executado com a peneira de 0,075mm. Em seguida, as amostras foram encaminhadas para a estufa com 105°C a 110°C de temperatura para secagem. O peneiramento foi iniciado com as amostras secas.

O processo foi de agitar as peneiras de forma manual ou com ajuda de um equipamento apropriado, em seguida a quantidade de material retido em cada peneira foi verificada e pesada. As peneiras utilizadas são de 4,750; 2,0; 1,180; 0,6; 0,42; 0,3; 0,15; 0,075mm;

Na Figura 15, a seguir, mostra-se algumas britas retiradas nesse processo de peneiramento:

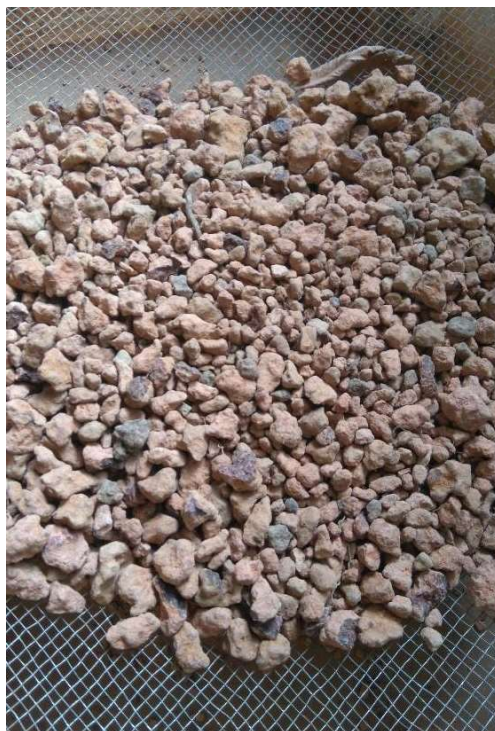


Figura 15 - Brita tirada do solo

3.2.1.1.3 Ensaio de Proctor

Obteremos através desse ensaio a densidade seca e a umidade ótima do solo natural, que deverão ser utilizados para a moldagem dos corpos de prova, do solo natural e do solo com aditivo Oxnix.

Deverão ser observados os seguintes passos:

- a) Secar a amostra de solo ao ar livre em temperatura ambiente;
- b) Preparar as amostras, segundo a DNER – ME 162/94.
- c) Aplicar nesse ensaio a energia do Proctor Intermediário, $12,97\text{kg cm}^3/\text{cm}^3$. Essa energia poderá ser conseguida utilizando-se os seguintes equipamentos:

- Cilindro grande;
- Soquete grande;
- Disco espaçador de $2 \frac{1}{2}$.

O ensaio de compactação seguiu as recomendações da norma, DNER – ME 162/94, prosseguindo com seu método de execução. Foi-se compactado o material no molde com o

disco espaçador em cinco camadas iguais de forma a se obter a altura total do corpo de prova, cerca de 12,5 cm depois da compactação. Aplicou-se em cada camada golpes com o soquete caindo de 45,72 cm, distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada. Seguindo o procedimento da norma, retira-se os excessos para determinar seu peso úmido compactado. Foi-se removido o corpo de prova do molde cilíndrico, retirando da sua parte central duas amostras para determinação da umidade. Pesou-se essas amostras até secarem e manter constância no peso, fazendo-se pesagens e obtendo a umidade representativa do corpo compactado. A energia utilizada foi a do método B (intermediária) que a norma descreve, para tráfego médio.

A seguir, conforme a Figura 16, é mostrado o corpo de prova com solo natural que foi submetido ao ensaio de Proctor:



Figura 16 - Ensaio Proctor do Solo Natural, sem brita

Agora, conforme a Figura 17, mostra-se o corpo de prova com o solo tratado com aditivo que também foi submetido ao ensaio de Proctor:



Figura 17 - Ensaio Proctor do Solo Tratado

3.2.1.1.4 Ensaio de determinação de Expansibilidade

A realização do ensaio foi realizado segundo com a norma DNIT 160/2012 – ME. A amostra foi preparada segundo a normalização, passada pela peneira de 0,42mm, seca a 60°C e esfriada em um frasco hermeticamente fechado. Montou-se o aparelho para a obtenção da expansibilidade, colocando sobre a base a placa porosa e fixando a esta o molde e respectivo colarinho.

Compactou-se o solo em duas camadas aproximadamente iguais, calculando cada porção, de tal modo que, após a compactação, o total exceda ligeiramente a borda do molde, feita por meio de soquete de compactação, comprimindo-se a parte superior do soquete até que sua parte móvel tocasse na base. Realizada a compactação, retirou-se o cilindro complementar, rasando cuidadosamente o excedente de solo com a espátula, de maneira a conseguir uma superfície perfeitamente plana e nivelada com as bordas do molde.

Colocou-se o aparelho dentro do recipiente de vidro e montou-se o extensômetro. É conveniente, para assegurar um encontro perfeito, que a leitura inicial seja superior a zero.

Colocou-se água destilada dentro do recipiente de vidro até o nível da face superior da base do aparelho, e colocou-se o cronômetro a funcionar.

Foram feitas leituras periódicas durante 4 dias, com início sempre as 9:00 horas da manhã.

3.2.1.1.5 Ensaio de Determinação de Penetração

O ensaio de Penetração foi feito nos corpos de prova tanto de solo Natural e quanto no solo aditivado com Oxnix, sendo executado segundo a norma DNIT 155/2010 – ME, a preparação da amostra também, que foi aquecida cuidadosamente, em estufa, para evitar superaquecimento local, até que ela ficasse fluída. Em seguida, com agitação constante, elevar a temperatura do material de, no máximo, 90°C acima do Ponto de Amolecimento.

Transferiu-se a amostra para o recipiente de penetração, para ter uma altura de material, após o resfriamento, à temperatura de ensaio, em no mínimo 120% de profundidade da penetração esperada.

3.2.1.1.6 Determinação de Índice Suporte Califórnia

Realizado segundo a norma DNIT 172/2016 – ME, na moldagem do corpo de prova, fixou-se o molde à sua base metálica, ajusta-se o cilindro auxiliar e apoia-se o conjunto em uma base. Compactou-se o material em cinco camadas iguais, de forma a se ter uma altura total de solo de cerca de 12,5 cm depois da compactação. Cada camada deve receber, no caso de material de subleito, 26 golpes, nos casos de materiais de sub-base ou base, respectivamente, caindo de 45,72 cm, e distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada. Removeu-se o cilindro complementar, tendo-se antes o cuidado de destacar, com o auxílio de uma espátula, o material a ele aderente.

Retirou-se do material excedente da moldagem uma amostra representativa de cerca de 100 g, para a obtenção do teor de umidade. Pesa-se essa amostra e secando-a em estufa a 105 °C – 110 °C, até constância de massa, e executam-se as pesagens, com incerteza de 0,1 g. Estes corpos de prova moldados serão utilizados nos ensaios de expansão e penetração.

O ensaio de penetração é realizado em uma prensa, devem ser colocadas no topo de cada corpo de prova, dentro do molde cilíndrico, as mesmas sobrecargas utilizadas no ensaio de expansão.

Leva-se esse conjunto ao prato da prensa e fez-se o assentamento do pistão de penetração no solo, através da aplicação de uma carga de, aproximadamente, 45N, controlada pelo deslocamento do ponteiro do extensômetro do anel dinamométrico; Zera-se o extensômetro do anel dinamométrico e o que mede a penetração do pistão no solo. Aciona-se a manivela da prensa (dispositivo micrométrico) com a velocidade de 1,27 mm/min. Cada leitura considerada no extensômetro do anel é função de uma penetração do pistão no solo e de um tempo especificado para o ensaio.

Resumindo, o cálculo para o valor do ISC, corresponde ao Cálculo da massa específica aparente do solo compactado e da expansão, quais foram descritas, e serão mostradas no próximo capítulo.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA

Como descrito no capítulo anterior, o ensaio foi submetido as peneiras segundo a ABNT, e suas porcentagens estão descritas conforme a *Tabela 8*:

Tabela 8 - Resultado do Ensaio de Granulometria

ENSAIO DE GRANULOMETRIA			
Peneiras ABNT	mm	gramas	(%)
4	4,75	9,03	6
10	2	30,62	20
16	1,18	4,31	3
30	0,6	2,1	1
40	0,42	1,02	1
50	0,3	1,1	1
100	0,15	3,11	2
200	0,075	2,42	2
	Fundo	96,29	64
Padrão 150g	Soma	150	100
Peneiradora	Perda	0	0

O solo estudado foi classificado, conforme mostrado na Tabela 9, segundo sua porcentagem nas peneiras a seguir:

Tabela 9 - Resultado da Classificação do Solo

CLASSIFICAÇÃO DO SOLO			
TIPO	NORMA	PENEIRA	%
Pedregulho	ABNT	$76 < \emptyset < 4,8$	0,00%
Areia	ABNT	$4,8 < \emptyset < 0,05$	34,19%
Silte	ABNT	$0,05 < \emptyset < 0,005$	1,61%
Argila	ABNT	$\emptyset < 0,005$	64,19%
Areia Grossa	AASHTO	$2,00 > \emptyset > 0,42$	25,37%
Areia Fina	AASHTO	$0,42 > \emptyset > 0,074$	4,42%
Silto + Argila	AASHTO	$0,0074 < \emptyset$	64,19%

Pode-se concluir, segundo a Tabela 2, pela classificação ABNT que este é classificado como um solo Silte-argiloso.

Para a determinação das dosagens apropriada para este solo, foi utilizado o método da norma DNER-ME 080/94, onde do peso da amostra total seca é pela soma dos pesos das frações retidas na peneira de 2,0mm e nas de maior abertura de malha. E em seguida tira-se a diferença do peso total da amostra seca ao ar e o peso anterior calculado que resulta no peso da fração da amostra seca ao ar, que passa na peneira de 2,0mm.

Obtém-se o peso total da amostra seca, segundo os passos da norma, e também calcula-se a porcentagem do peso da amostra total seca, que é a porcentagem da amostra total seca retira em cada peneira com o peso da fração retida em cada uma das peneiras. E dando sequência ao método da norma, obtém-se a porcentagem do material seco passando em cada peneira, que é o último item da tabela.

4.2 RESULTADO DO ENSAIO DE PROCTOR

Os resultados a seguir, e resumidos na tabela, foram obtidos através do processo descrito na norma DNER-ME 162/94, em que os cálculos são da maneira seguinte:

- Umidade (Eq. 2):

$$h = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

(Eq. 2)

Onde:

h = teor de umidade em %;

Ph = Peso da amostra úmida;

Ps = Peso da amostra seca;

- Massa específica aparente do solo seco compactado (Eq. 3):

a) Calcular primeiramente a massa específica aparente do solo úmido, após cada compactação:

$$\gamma_h = \frac{P'h}{V}$$

(Eq. 3)

Onde:

γ_h = massa específica aparente do solo úmido;

$P'h$ = peso do solo úmido compactado;

V = volume do solo compactado;

b) Determinar a seguir a massa específica aparente do solo seco, após cada compactação (Eq. 4):

$$\gamma_s = \gamma_h \cdot \frac{100}{100 + h}$$

(Eq. 4)

Onde:

γ_s = massa específica do solo seco, em g/cm³;

γ_h = massa específica aparente do solo úmido, em g/cm³;

h = teor de umidade do solo compactado.

A seguir, conforme a Tabela 10, estão os valores usados dos componentes para a realização do ensaio:

Tabela 10 - Valores do Ensaio de Proctor

ENSAIO DE PROCTOR - Compactação com reposição							
Aditivos e reagentes	29/11 /2018	Composição de água na reposição do solo					
		%	Um. Higros.	19%	21%	23%	25%
% água em relação ao peso do solo							
Amostra úmida + cápsula	g	83,04	82,96	83,47	83,73	83,02	83,51
Amostra seca + cápsula	g	82,04	74,94	74,93	74,68	73,1	73,14
Água	g	1	8,02	8,54	9,05	9,92	10,37
Amostra seca + cápsula	g	49,06	42	41,48	41,03	40,16	39,7
Cápsula	g	32,98	32,94	33,45	33,65	32,94	33,44
Teor de umidade	%	2,04%	19,10%	20,59%	22,06%	24,70%	26,12%
Solo seco	g	5.038	4.976	4.916	4.812	4.757	
Volume de solução - água	ml	1.140	120	120	120	120	
Acumulado - água	ml	1.140	1.260	1.380	1.500	1.620	
Solo úmido + cilindro	g	8.975	9.100	9.535	9.665	9.390	
Massa de solo úmido	g	3.465	3.590	4.025	4.155	3.880	
Densidade do solo úmido	g/cm ³	1,683	1,744	1,955	2,018	1,884	
Densidade do solo seco	g/cm ³	1,413	1,446	1,602	1,618	1,494	
Peso do cilindro	g	5.510	5.510	5.510	5.510	5.510	

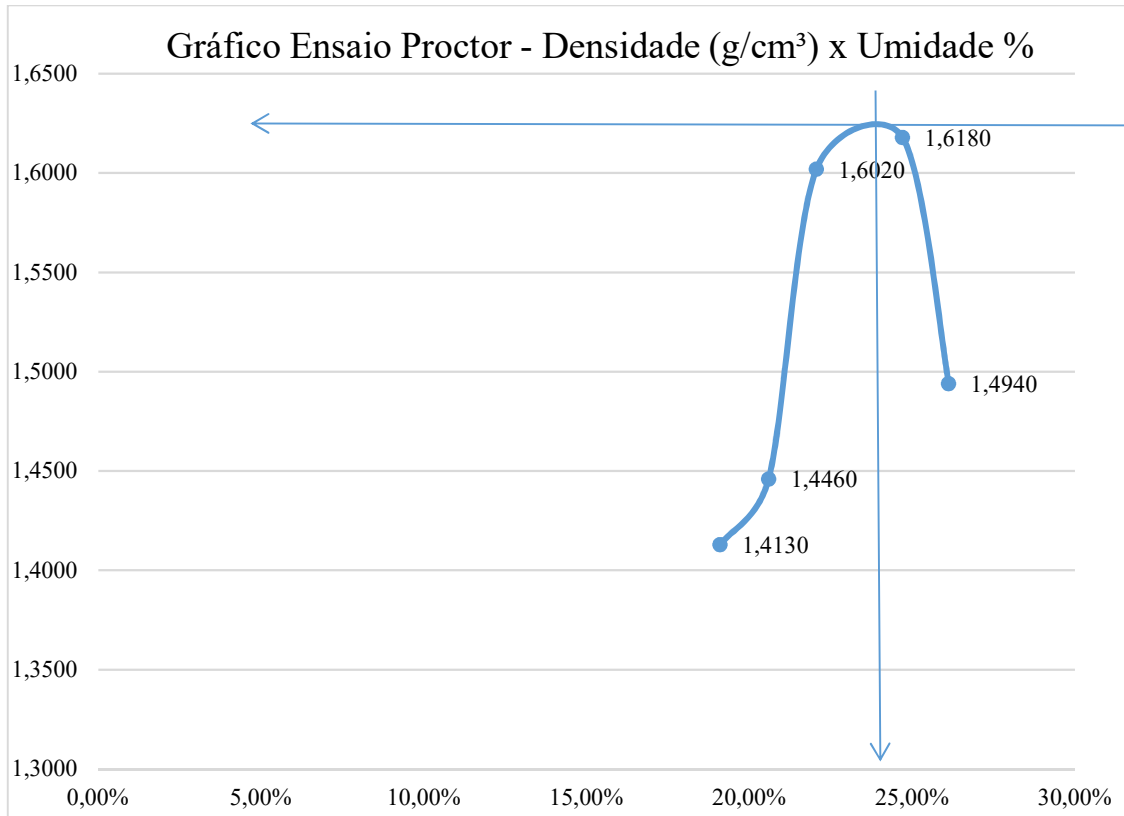
Resultado Final a seguir, segundo a Tabela 11, lembrando que segundo Pinto (2006), o ideal para solos silto argiloso fica entre 1,6 e 1,7 a curva.

Tabela 11 - Resultado Final do Ensaio de Proctor

Altura útil (mm)	115
Volume útil (cm ³)	2059
Umidade higroscópica (%)	2,04
Peso do solo úmido (g)	6000
Umidade ótima (%)	24,7
Densidade Aparente máxima g/cm ³	1,6032

A seguir, mostrado no Gráfico 1, está a curva de compactação obtida no ensaio:

Gráfico 1 - Curva de Compactação



4.3 QUADRO RESUMO

A seguir, conforme a Tabela 12, será mostrado um quadro resumo com quantidades e resultados da preparação e compactação feitas no laboratório, tanto para o solo natural, quanto para o solo com o aditivo Oxnix. Assim também como as metodologias usadas para preparar as soluções mencionadas.

Tabela 12 - Quadro Resumo do solo Natural

Ensaio de Laboratório - Preparação e Compactação	
Ensaio de Proctor na energia intermediária - Natural , cilindro E	Data: 28/11/18
Densidade aparente máxima seca do solo a ser tratado	1,60%
Umidade Ótima de compactação	24,70%
Peso da amostra de solo	6.000 g
Umidade higroscópica da amostra	2,04%
Soluções Preparadas	
Massa seca de solo - MS	5.878 g
Quantidade de água para atingir o Hot	1.332,1 ml
Metodologia: Introduzir as soluções separadamente na mostra do solo, homogeneizá-los e compactar na energia Intermediária (26 golpes em 5 camadas)	
Controle de moldagem	
Peso de molde do cilindro de CBR utilizado	5.510g
Volume de molde do cilindro	2.059cm ³
Peso do cilindro de CBR + solo compactado na energia intermediária	9.635 g
Umidade de compactação	23,00%
Peso do solo úmido compactado	4.125 g
Peso do solo seco	4.043 g
Densidade úmida	2,003 g/cm ³
Densidade seca	1,628 g/cm ³
Grau de compactação	98,00%
Quantidade de água existente no Corpo de prova	82 g ou ml
Quantidade de água a perder no processo de cura de 40%	33 g
Peso do cilindro + solo a ser atingido após perda de 40%	9.602 g

Observação: as duas tabelas mostradas, tanto a Tabela 12 quanto a Tabela 13, estão exibindo procedimentos indicados segundo o fabricante do aditivo.

A seguir, conforme a Tabela 13, está mostrado os dados do ensaio realizado com o solo aditivado:

Tabela 13 - Quadro Resumo do solo aditivado com Oxnix

Ensaio de Laboratório - Preparação e Compactação	
Ensaio de Proctor na energia intermediária - OXNIX + CAL - CILINDRO F	Data: 28/11/18
Densidade aparente máxima seca do solo a ser tratado	
Umidade Ótima de compactação	24,70%
Peso da amostra de solo	6.000 g
Umidade higroscópica da amostra	2,04%
Dosagem a ser empregada	
Oxnix a l	1000,00
Oxnix em pó	300 g
Oxnix/ kg de terra	10,8 g
Cal hidratada ou cimento a 3,0%	4,66
Oxnix a 10%	0,1
Soluções Preparadas	
Massa seca de solo - MS	5.878 g
Quantidade de água para atingir o Hot	1452 ml
Quantidade de solução Oxnix a 10%	60 ml
Quantidade de Cal ou cimento	180 g
Quantidade de água a ser completada com a solução de oxnix	1392 ml
Provetas com solução de Oxnix + água	1452 ml
Colocar a quantidade de Cal na amostra do solo, homogeneizá-los e introduzir a proveta com OXNIX, homogeneizá-la e compacta-la na energia Intermediária Introduzir as soluções separadamente na amostra do solo, homogeneizá-los (26 golpes em 5 camadas)	
Controle de moldagem	
Peso de molde do cilindro de CBR utilizado	5.500g
Volume de molde do cilindro	2.059cm ³
Peso do cilindro de CBR + solo compactado na energia intermediária	9.610 g
Umidade de compactação	25,42%
Peso do solo úmido compactado	4.110 g
Peso do solo seco	3.277 g
Densidade úmida	1,996g/cm ³
Densidade seca	1,592 g/cm ³
Grau de compactação	79,73%
Quantidade de água existente no Corpo de prova	833 g ou ml
Quantidade de água a perder no processo de cura de 40%	333 g
Peso do cilindro + solo a ser atingido após perda de 40%	9.277 g
Observações	
Após o processo de cura e o peso do molde + solo na faixa de tolerância, introduziremos o molde com os dispositivos de expansão em tanque d'água por 96h.	

4.4 RESULTADO DO ENSAIO DE EXPANSÃO

Segundo o método da norma DNIT-ME 160/12, a expansibilidade (Eq. 5) é dada por:

$$\frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 = \frac{L_1 - L_0}{15} \cdot 100$$

(Eq. 5)

Onde:

Δh = variação de altura;

h_0 = altura inicial;

L_0 = leitura inicial;

L_1 = leitura do extensômetro;

Todos os valores em milímetros, e o resultado deve ter a unidade arredondada, estão mostrados na *Tabela 14*.

Tabela 14 - Resultado do Ensaio de Expansão

ENSAIO DE LABORATÓRIO - EXPANSÃO				
Produto: Solo Natural				
Ensaio de imersão em água - 96hrs		Data de início:		Expansão (mm)
		02/12/18		
		Data término:		0,05
		06/12/18		
Tempo Decorrido (dias)	Data	Hora	Leitura (mm)	Diferença (mm)
Início	02/dez	09:00	0,00	0,00
1	03/dez	09:00	0,04	0,04
2	04/dez	09:00	0,05	0,01
3	05/dez	09:00	0,05	0,00
4	06/dez	09:00	0,05	0,00

Produto: Solo Oxnix + Cal				
Ensaio de imersão em água - 96hrs		Data de início:		Expansão (mm)
		02/12/18		
		Data término:		0,26
		06/12/18		
Tempo Decorrido (dias)	Data	Hora	Leitura (mm)	Diferença (mm)
Início	02/dez	09:00	0,00	0,00
1	03/dez	09:00	0,24	0,24
2	04/dez	09:00	0,25	0,01
3	05/dez	09:00	0,26	0,01
4	06/dez	09:00	0,26	0,00

4.5 RESULTADO DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO

Segundo a Norma do DNIT-ME 155/10, a penetração em décimos de milímetro, deve ser a média obtida, aproximada até a unidade, de no mínimo três determinações, cujos valores não se afastem mais que os indicados na *Tabela 15*:

Tabela 15 - Valores de Penetração segundo o DNIT

Penetração (0,1mm)	Diferença máxima entre o valor mais alto e o valor mais baixo das determinações (0,1mm)
0 até 49	2
50 até 149	4
150 até 249	12
250 até 500	20

A seguir, na *Tabela 16*, será mostrado os resultados de penetração para o solo natural:

Tabela 16 - Resultado do ensaio de Penetração para o Solo natural

ENSAIO DE LABORATÓRIO - PENETRAÇÃO						
Moldagem: Natural		Solo Natural - E		Peso: 9.665 kg		
Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (µm)	Leitura (mm)	Carga (kgf)	Carga (N)	Pressão (mPa)
0,50	0,63	70,00	0,07000	6,80	66,90	126,69
1,00	1,27	132,00	0,13200	12,90	126,10	238,91
1,50	1,90	165,00	0,16500	16,10	157,70	298,63
2,00	2,54	187,00	0,18700	18,20	178,70	338,45
2,50	3,17	208,00	0,20800	20,30	198,80	376,46
3,00	3,81	224,00	0,22400	21,80	214,10	405,42
3,50	4,44	239,00	0,23900	23,30	228,40	432,57
4,00	5,08	250,00	0,25000	24,40	238,90	452,48
5,00	6,35	271,00	0,27100	26,40	259,00	490,48
6,00	7,62	291,00	0,29100	28,40	278,10	526,68
7,00	8,89	303,00	0,30300	29,50	289,60	548,40
8,00	10,16	321,00	0,32100	31,30	306,80	580,98
9,00	11,43	245,00	0,24500	23,90	234,10	443,43
10,00	12,70	342,00	0,34200	33,30	326,80	618,99

Constante prensa: 97,45 kgf/cm²

Agora, segundo a Tabela 17, mostra-se os resultados de penetração para o solo aditivado.

Tabela 17 - Resultado do Ensaio de Penetração do solo com aditivo Oxnix + Cal

Moldagem: Oxnix 1:1000 + Cal 3%		Solo Oxnix + Cal		Peso: 9.620 kg		
Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (μ m)	Leitura (mm)	Carga (kgf)	Carga (N)	Pressão (mPa)
0,50	0,63	32,00	0,03200	3,10	30,60	57,92
1,00	1,27	68,00	0,06800	6,60	65,00	123,07
1,50	1,90	110,00	0,11000	10,70	105,10	199,09
2,00	2,54	145,00	0,14500	14,10	138,60	262,44
2,50	3,17	172,00	0,17300	16,80	164,40	311,30
3,00	3,81	195,00	0,19500	19,00	186,40	352,93
3,50	4,44	215,00	0,21500	21,00	205,50	389,13
4,00	5,08	238,00	0,23800	23,20	227,40	430,76
5,00	6,35	270,00	0,27000	26,30	258,00	488,67
6,00	7,62	300,00	0,30000	29,20	286,70	542,97
7,00	8,89	328,00	0,32800	32,00	313,50	593,65
8,00	10,16	350,00	0,35000	34,10	334,50	633,47
9,00	11,43	372,00	0,37000	36,30	355,50	673,28
10,00	12,70	390,00	0,39000	38,00	372,70	705,86

Constante prensa: 97,45 kgf/cm²

4.6 RESULTADO DO ENSAIO DE ÍNDICE SUPORTE CALIFÓRNIA

Para o cálculo, como está descrito na norma DNIT-ME 172/16, precisa-se do cálculo da massa específica aparente do solo compactado, teor de umidade e cálculo da expansão, quais já foram calculados nos itens anteriores.

O Índice de Suporte Califórnia (ISC), em porcentagem, para cada corpo de prova, é obtido pela fórmula a seguir (Eq. 6):

$$ISC = \frac{\text{Pressão calculada}}{\text{pressão padrão}} \times 100$$

(Eq. 6)

Na Tabela 18, estão os resultados referentes ao ensaio de ISC.

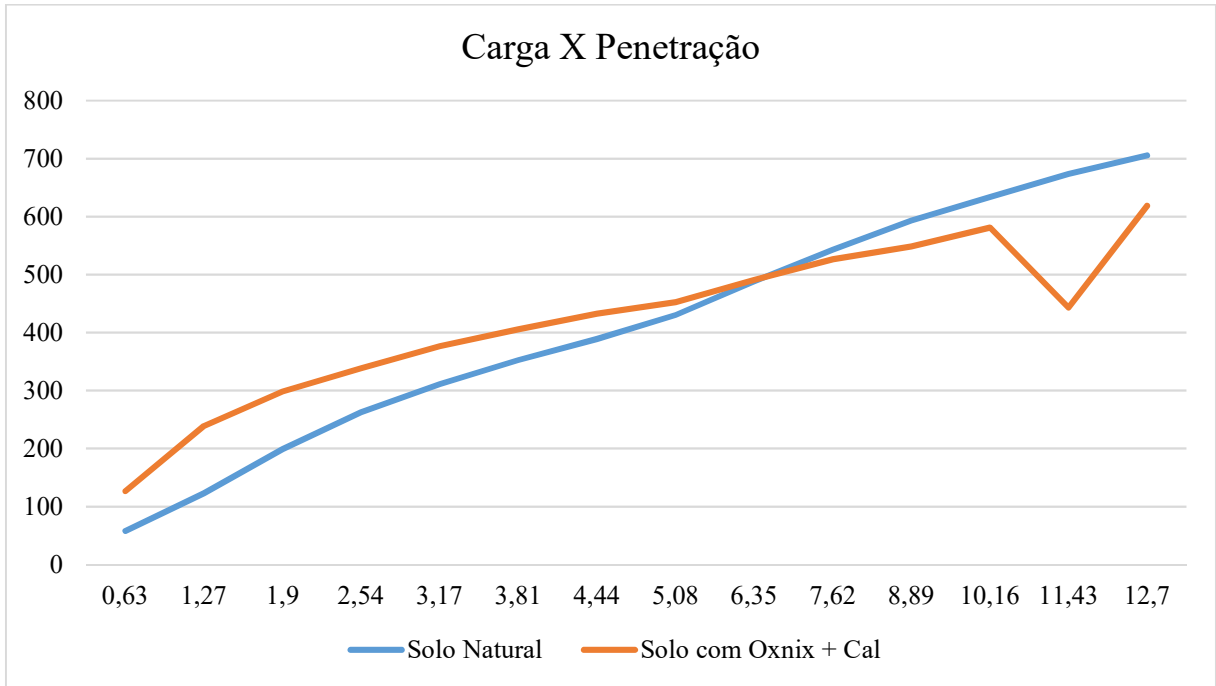
Tabela 18 - Resultado do ensaio de ISC

Ensaio de Laboratório - Cálculo de Índice suporte Califórnia ISC								
Resultado após Expansão e Penetração								
Penetração (mm)	Solo Natural				Solo Oxnix + Cal			
	Pressão (mPa)			ISC (%)	Pressão (mPa)			ISC (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão		Calculada	Corrigida	Padrão	
2,54	338,5	xxx	6,9	49,05	262,44	xxx	6,9	38,03
5,08	452,48	xxx	10,35	43,72	430,76	xxx	10,35	41,62
Expansão 96 hrs	0,05				0,26			
Perda de massa	-0,21%				-0,10%			
Data	06/12/2018				06/12/2018			
RESULTADO ISC	49				42			

Para a obtenção gráfica do Índice de Suporte Califórnia final, a norma recomenda que de preferência, na mesma folha em que se representa a curva de compactação, usando-se a mesma escala das unidades de moldagem, registram-se, em escala adequada, sobre o eixo das ordenadas, os valores dos Índices de Suporte Califórnia obtidos segundo este Método, correspondentes aos valores das umidades que serviram para a construção da curva de compactação anteriormente descrita.

O valor da ordenada dessa curva, correspondente à umidade ótima antes determinada, fornece o Índice de Suporte Califórnia (ISC), conforme o Gráfico 2, a seguir:

Gráfico 2 - Gráfico do Resultado de ISC



5 CONCLUSÃO

Por fim, alguns resultados foram obtidos por este trabalho de conclusão de curso para a área de pavimentação no estado do Amapá, principalmente na região oeste onde a pesquisa foi realizada. Mesmo sabendo que o uso de aditivos em solos argilosos propicia um superávit significativo em sua resistência, deve-se atentar a escolha adequada do material e de sua dosagem a qual é submetido, pois isto influencia diretamente na mistura. Diante dos dados obtidos e do referencial estudado, afirma-se que:

- Para a região da cidade em questão, Macapá, foi encontrado, como mostrado no capítulo 4, que o solo se encaixa como Silte Argiloso, e para obtenção de uma performance mais vantajosa, o aditivo mais indicado seria a cal virgem na dosagem de 5% do total de massa do solo, bem como a mistura com um solo com mais de 30% de argila;

- Dos dois baldes de terra enviados a empresa, como descritos pela exigência da mesma, uma grande parte eram pedregulhos e o que restou foi suficiente apenas para os ensaios mais importantes. Não sobrou material virgem para fazer a identificação e dosagem de argila por decantação. No teste de granulometria não se pode fazer a determinação de argila, por falta de material em condições de análise.

- Não ocorreu o esperado, que seria de uma boa estabilização. Nos resultados da análise, observa-se que após aplicação do produto os resultados são inferiores ao da terra natural. Isto é típico de uma terra predominantemente não reativa. Silte e areia não são reativos.

- Mesmo que no teste de granulometria a porcentagem tenha apontado para um solo siltoso-argiloso, não houve reação com a aplicação do produto, então presume-se que não há argila em quantidade mínima para promover a reação com o aditivo. A quantidade mínima é 30% de argila no solo.

- Logo, pelos resultados obtidos, conclui-se que o solo analisado contém menos de 5% de argila, e o restante todo silte, o que explicaria os resultados explicitados e a não estabilização.

- Ou seja, para o aproveitamento do estabilizante de solo Oxnix nas terras desejadas, seria necessário a busca por um solo argiloso, trazido de uma jazida mais próxima, podendo obter uma boa mistura e ter uma excelente estabilização.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Para futuras pesquisas fica em aberto a sugestão de uma utilização do mesmo método para solos de diferentes regiões da cidade de Macapá. Bem como modificar o tipo de aditivo químico utilizado, pois estes é ideal para argilas.
- Buscar um método de estabilização alternativo para os solos siltosos e arenosos da cidade de Macapá, tendo em vista que a cidade é carente quando se trata de pesquisas relacionadas a seu solo ou sua pavimentação.
- Para outras áreas além da Engenharia, seria uma excelente alternativa uma análise sobre as reações que ocorrem entre as moléculas quando se junta o solo e o aditivo, assim seria possível uma determinação de dosagens adequadas e uma boa indicação de cada tipo de solo para cada tipo de aditivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, P. M. (s.d.). Introdução à Pavimentação.
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos solos e suas aplicações - Fundamentos* (6ª ed., Vol. 1).
- CIESP, F. /. (2017). Pavimentos de via no Brasil: infraestrutura de transportes terrestres rodoviários e cadeias produtivas da pavimentação. São Paulo, Brasil.
- Danilo Ferreira Camargo, L. A. (2017). ANÁLISE DE ADEQUAÇÃO EM PROJETO RODOVIÁRIO COM SERVIÇOS DE PAVIMENTAÇÃO E DRENAGEM. ESTUDO DE CASO: PASSAGEM DE EDILÂNDIA. Anápolis/GO, Brasil.
- Dr. João Virgílio Merighi, R. M. (s.d.). Construção de Pavimentos (Notas de aula).
- Estatística, I. -I. (2017). *IBGE*. Obtido em 2018, de www.ibge.gov.br:https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ap/panorama
- IPR, I. d. (2010). NORMA DNIT 155/2010-ME. *Determinação de Penetração - Método de Ensaio*.
- IPR, I. d. (2016). NORMA DNIT 172/2016 - ME. *Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas - Método de ensaio*.
- Laís Costa Brito, H. d. (Setembro de 2017). Estabilização de solo. *01, 06*. Brasil: Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.
- Liedi Bariani Bernucci, L. M. (2010). *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros* (3ª Reimpressão ed.). Rio de Janeiro.
- Manual de Pavimentação de São Paulo. (s.d.).
- MARQUES, P. G. (2006). Notas de Aula da Disciplina Pavimentação. Juiz de Fora.
- Nunes, R. B. (2017). Pavimentação - Notas de aula.
- Pesquisa CNT de Rodovias 2017. (s.d.).
- Pinto, C. d. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos* (3ª ed.). São Paulo.
- Públicas, A. -A. (2016). Manual de Pavimentação Urbana. Goiás.
- Rodagem, M. -D. (1994). Solos - Ensaio de Compactação utilizando amostras trabalhadas. *DNER - ME 162/94*.
- Rodagens, M. -D. (1994). Análise Granulométrica por peneiramento - Método de Ensaio. *DNER - ME 080/94*.

- Rossi, A. C. (2017). ETAPAS DE UMA OBRA DE PAVIMENTAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO PARA UMA VIA NA ILHA DO FUNDÃO. Rio de Janeiro.
- Senço, W. d. (2007). *Manua de Técnicas de Pavimentação* (2ª ed., Vol. I). São Paulo.
- Técnicas, A. B. (junho de 1987). NBR 9895 - Solo - Índice Suporte Califórnia - Método de Ensaio.
- Transportes, D. -D. (2006). Manual de Pavimentação. 3ª. Rio de Janeiro.
- Transportes, D. -D. (2012). NORMA DNIT 160/2012 - ME. *Solos - Determinação de Expansibilidade - Método de ensaio*.
- Viana, H. M. (s.d.). Notas de aula de Pavimentação.