



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



ROBERT MATHEUS SANTOS SANTANA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESTABILIZANTE QUÍMICO EM SOLOS
UTILIZANDO A METODOLOGIA MCT**

São Cristóvão - SE

(2023)

ROBERT MATHEUS SANTOS SANTANA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESTABILIZANTE QUÍMICO EM SOLOS
UTILIZANDO A METODOLOGIA MCT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS) como requisito para o título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida

São Cristóvão - SE

(2023)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL
dec

ATA DE DEFESA

Robert Matheus Santos Santana

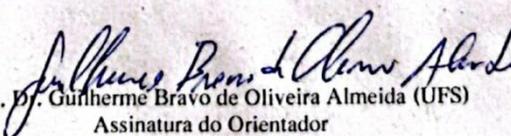
Análise da eficiência de estabilizante químico em solos utilizando a metodologia MCT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS) como requisito para o título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 05 de maio de 2023

Banca Examinadora	Nota
Orientador: Prof ^o . Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida (UFS)	- 9,3
<u>Silmara Nunes Santos</u> Examinador: Eng ^a . Me. Silmara Nunes Dantas (Externo)	9,5
<u>Vanderson Pereira Santos Soares</u> Examinador: Eng ^o . Vanderson Pereira Santos Soares (Externo)	9,0

Média Final:


Prof^o. Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida (UFS)
Assinatura do Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

À Deus por me conceder o dom da vida e de sempre providenciar anjos ao longo dela.

Aos meus pais, Aguiamaria Andrade dos Santos Santana e Sérgio Luiz Rosário Santana por sempre acreditar no meu potencial e não medirem esforços para me proporcionar uma vida digna.

À minha vó Maria José, por tamanho cuidado comigo em seu lar, sempre me proporcionando condições para focar exclusivamente nos estudos.

À minha família por todo apoio nos momentos difíceis durante a jornada acadêmica, em especial minha Tia Simone por tamanha dedicação e amor para comigo, sempre auxiliando meus pais em todas as situações, principalmente no nosso comércio visando o meu sustento na Universidade.

Aos meus primos, representados por Luis Felipe, por todo o respeito e otimismo em quem eu sou e o que estou me tornando, onde cada um com seu jeito, me motiva a seguir em frente em busca do sonho de ser um engenheiro civil.

À minha namorada Lilian Luara, por tamanha paciência e compreensão em cada ausência e cada momento longe durante nosso relacionamento em respeito às tamanhas obrigações que sempre tive durante a graduação.

Aos amigos que a jornada acadêmica me concedeu, Arnóbio, Victória, Roberta, Victor, Estéfane, Mikael, Jamyson, Antônia, Graziela, Raphael, Érika, Caio, Crasso, Thauany, Thayná, Thyago, entre outros. O número é tão grande que se fosse descrever aqui não sobraria espaço para o TCC. Então generalizo para que se possa seguir em frente, juntos como passamos pela pandemia com o grupo Até o Fim e depois a frente do Centro Acadêmico de Engenharia Civil (CAEC).

À Universidade Federal de Sergipe e todos os professores responsáveis pelo meu desenvolvimento acadêmico, representados pelo orientador Guilherme Bravo que com toda humildade, paciência e disponibilidade me incentivou a desenvolver bem o trabalho.

Aos técnicos do GeoPav, Willami Santos e Luiza Ramos, por todo o apoio durante a realização dos ensaios.

À minha amiga-irmã Thais Menezes por tamanha parceria construída durante o ciclo acadêmico e que a cada dia só aumenta, você foi fundamental para a realização desse trabalho.

RESUMO

A estabilização de solos tem como objetivo melhorar as características do mesmo para que se atenda às especificações ao qual se quer utilizá-lo. Há várias maneiras de se fazer a estabilização, através da estabilização mecânica ou de forma química com o uso de algum composto químico, no caso particular, o Dynabase. Este aditivo, segundo o fabricante, é um estabilizante químico composto por hidróxido de cálcio que tem como objetivo melhorar a capacidade de suporte e impermeabilizar, sendo assim, pode-se evitar o bota-fora e reduzir os custos da obra. Com o objetivo de analisar a eficiência do estabilizante químico citado nos solos tropicais do estado de Sergipe, foi utilizada a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). Para a realização dos ensaios, foram utilizados os teores de 3% e 5% do produto comercial em duas amostras de solo extraídas da mesma jazida no município de Siriri/SE. Ao realizar os ensaios de caracterização física (análise granulométrica conjunta e limites de Atterberg) percebeu o aumento da fração fina retida na peneira de 0,075mm e a redução do índice de plasticidade em comparação ao solo puro. Para os ensaios de caracterização mecânica, (mini compactação, mini-CBR e expansão) foi percebido uma redução nos valores de massa específica aparente seca máxima e constância nos valores de umidade ótima, um aumento nos valores de mini-CBR e uma redução nos valores de expansão.

Palavras-chave: Estabilização de solos; MCT; Dynabase.

ABSTRACT

Soil stabilization aims to improve its characteristics so that it meets the specifications for which you want to use it. There are several ways to perform the stabilization, through mechanical stabilization or chemically with the use of a chemical compound, in this particular case, Dynabase. This additive, according to the manufacturer, is a chemical stabilizer composed of calcium hydroxide that aims to improve the support capacity and waterproofing, thus avoiding the throw-away and reducing the costs of the work. With the objective of analyzing the efficiency of the mentioned chemical stabilizer in the tropical soils of the state of Sergipe, the MCT methodology (Miniature, Compacted, Tropical) was used. To carry out the tests, the levels of 3% and 5% of the commercial product were used in two soil samples extracted from the same deposit in the municipality of Siriri/SE. When carrying out the physical characterization tests (joint granulometric analysis and Atterberg limits) he noticed an increase in the fine fraction retained in the 0.075mm sieve and a reduction in the plasticity index compared to pure soil. For the mechanical characterization tests (mini compaction, mini-CBR and expansion) a reduction in the values of maximum apparent dry specific mass and constancy in the values of optimal humidity, an increase in the values of mini-CBR and a reduction in the values of expansion.

Keywords: Soil Stabilization; MCT; Dynabase.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Esquema simplificado da formação pedogenética dos solos tropicais.	16
Figura 2: Designação genética geral das camadas de solos, nas regiões tropicais.....	17
Figura 3: Corte rodoviário, com camada laterítica sobrejacente à camada saprolítica de origem sedimentar, com as correspondentes microestruturas.....	17
Figura 4: Ocorrência de solos lateríticos em termos mundiais.....	18
Figura 5: Ocorrências de solos finos arenosos e argilosos lateríticos, no Brasil.....	19
Figura 6: Classificação de solos segundo a metodologia MCT.	21
Figura 7: Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas.....	23
Figura 8: Diferentes tipos de distribuição granulométrica.	24
Figura 9: Relação entre os valores da Wot e o teor de emulsão.	30
Figura 10: Relação entre os valores de peso específico máximo e o teor de emulsão.	30
Figura 11: Relação entre o tempo de cura, a expansão e o CBR.....	32
Figura 12: Curva granulométrica do RCD puro com a faixa granulométrica A.	34
Figura 13: Curva granulométrica RCD-aditivo e faixa granulométrica C.	34
Figura 14: Curvas de Compactação - Amostra 01.....	35
Figura 15: Curvas de Compactação - Amostra 02.....	35
Figura 16: Curvas de Compactação - Amostra 03.....	36
Figura 17: Solo puro.....	34
Figura 18: Dynabase - estabilizante de Solos.....	35
Figura 19: Ensaio de análise granulometria por sedimentação.	37
Figura 20: Execução do ensaio de massa específica real.	37
Figura 21: Execução do limite de liquidez.	38
Figura 22: Execução do ensaio do limite de plasticidade.....	39
Figura 23: Execução do ensaio de mini compactação.	40
Figura 24: Execução do ensaio perda de massa por imersão.	41
Figura 25: Determinação da expansão.....	41
Figura 26: Execução do ensaio mini-CBR.	42
Figura 27: Curvas granulométricas - registro 07.....	57
Figura 28: Curvas granulométricas - registro 08.....	58
Figura 29: Determinação do Pi - registro 07.....	61
Figura 30: Determinação do Pi - registro 08.....	61
Figura 31: Classificação MCT - registro 07.....	62

Figura 32: Classificação MCT - registro 08	62
Figura 33: Resultados da mini compactação do solo puro - registros 07 e 08.	63
Figura 34: Relação entre MEAS, índice de vazios e umidade.	64
Figura 35: Resultados de mini-CBR do solo puro - registros 07 e 08.....	65
Figura 36: Resultados da mini compactação das amostras do registro 07 - solo puro e 3% DB.	66
Figura 37: Resultados da mini compactação do registro 08 - solo puro e 5% DB.....	66
Figura 38: Resultados do mini-CBR - registro 07.....	67
Figura 39: Resultados do mini-CBR - registro 08.....	67

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1:Faixas granulométricas.....	25
Tabela 2: Resultados obtidos nos ensaios de compactação, ISC, expansão, índice de vazios na umidade ótima.	28
Tabela 3: Informações da análise granulométrica; Índices de Consistência e Classificação de Solos.	29
Tabela 4: Valores de teor ótimo de emulsão e máximos de ISC obtidos para misturas asfálticas.	31
Tabela 5: Relação entre o teor de Dynabase e a expansão.	33
Tabela 6: Resultados do IP.	35
Tabela 7: Valores do MEAS.....	36
Tabela 8: Valores da umidade ótima.	36
Tabela 9: Resultados de CBR e Expansão.....	37
Tabela 10: Composição química do dynabase.	35
Tabela 11: Resumo dos valores do ensaio de limites de Atterberg.	59
Tabela 12: Parâmetros dos registros 07 e 08.	60
Tabela 13: Resumos dos ensaios de caracterização.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

CBR - California Bearing Ratio;

DB – Dynabase;

DER/SP - Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo;

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem;

HRB - Highway Reserach Board;

ISC - Índice de Suporte Califórnia;

MCT – Miniatura, Compactado, Tropical;

MCV – Moisture Condition Value;

MEAS – Massa Específica Aparente Seca;

RCD – Resíduo de Construção e Demolição;

RG – Registro;

USCS - Unified Soil Classification System;

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
Considerações iniciais	13
Relevância e justificativa da pesquisa	14
Objetivos.....	14
Estrutura deste trabalho de conclusão de curso	14
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
1.1 SOLOS TROPICAIS	16
1.2 CLASSIFICAÇÃO MCT	19
1.3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	22
1.3.1. Estabilização granulométrica	23
1.3.2. Estabilização Química	26
1.3.2.1. Estabilização Química com cal	26
1.3.2.2. Estabilização Química com Cimento Portland.....	27
1.3.2.3. Estabilização Química com Betume	29
1.3.2.4. Estabilização Química com Dynabase	31
2. MATERIAIS E MÉTODOS	34
2.1 Materiais	34
2.2. Métodos	36
2.2.1. Ensaio de caracterização física	36
2.2.1.1. Análise granulométrica conjunta	36
2.2.1.2. Massa específica real	37
2.2.1.3. Limites de Atterberg.....	38
2.2.1.3.1. Limite de liquidez.....	38
2.2.1.3.2. Limite de Plasticidade	38
2.2.2. Ensaio de classificação MCT	39
2.2.2.1 Mini compactação.....	39

2.2.2.2. Mini-MCV	40
2.2.2.3. Perda de Massa por Imersão	40
2.2.2.4. Mini-CBR e Expansão	41
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
3.1. Caracterização física.....	57
3.2 Classificação MCT	60
3.3. Caracterização Mecânica.....	62
4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

INTRODUÇÃO

Considerações iniciais

A utilização dos solos para pavimentação é um tema bem recorrente no dia a dia. Através da realização de ensaios geotécnicos são definidas quais características que os solos possuem e em quais camadas de pavimentos os mesmos podem ser utilizados, segundo as normas de países de climas temperados, como os Estados Unidos, por exemplo.

O Brasil está localizado na região geográfica denominada intertropical, ou seja, localizada entre os trópicos de Câncer e Capricórnio. Essa região possui características favoráveis ao intemperismo intenso e rápido, com altas temperaturas e chuvas abundantes, que favoreceram a diferenciação pedológica dos solos desse país. Tais solos são conhecidos como solos tropicais e são subdivididos em solos lateríticos, saprolíticos e transportados.

Os solos lateríticos e saprolíticos são as duas grandes classes destacadas entre os solos tropicais. Solos lateríticos (later, do latim: tijolo) é um tipo de solo superficial, pertencentes aos horizontes A e B de perfis bem drenados, enquanto que os solos saprolíticos (sapro, do grego: podre) são aqueles que resultam da decomposição e/ou desagregação “in situ” da rocha matriz pela ação das intempéries (chuva, insolação, geadas) mantendo ainda a estrutura da rocha que lhe deu origem. (VILLIBOR e ALVES, 2019, págs. 30 - 31).

Ao analisar as características dos solos tropicais, segundo Barroso e Fabbri (1997), as metodologias tradicionais do meio rodoviário, como a HRB (Highway Research Board) e a USCS (Unified Soil Classification System) podem classificar os solos lateríticos e saprolíticos como sendo de uma mesma classe, pode ser conferido ao solo de comportamento laterítico um desempenho inferior ao observado na prática. Segundo Costa (2006), os solos lateríticos podem se tornar uma pavimentação alternativa em obras de pequena intensidade de tráfego como em conjuntos habitacionais, pequenas comunidades e bairros periféricos, onde a pavimentação tradicional pode tornar a execução inviável, principalmente com os custos de bota-fora e compra de materiais em jazidas.

Para que seja possível a obtenção mais precisa das características geotécnicas dos solos tropicais foi criada a metodologia MCT (Miniatura, Compactada, Tropical). Através dela, foi possível a realização de ensaios mais eficientes com a utilização de equipamentos em miniatura, possibilitando a economia no uso do material em estudo e, por meio de correlações de parâmetros geotécnicos, pode-se determinar se o solo em estudo, apresenta comportamento laterítico ou não.

Ao analisar um solo tropical e o mesmo não atender aos critérios normativos para que seja utilizado em camadas de pavimentos, pode-se realizar o processo denominado estabilização. Tal processo engloba técnicas de caráter mecânico, físico ou químico para corrigir principalmente os parâmetros referentes à expansibilidade,

compressibilidade, resistência, permeabilidade e durabilidade (SOUZA, 2022, pg. 10).

Para o presente trabalho, foi utilizada a estabilização química com objetivo de analisar a eficiência de um produto comercial, conhecido como Dynabase.

O estabilizante químico é composto por hidróxido de cálcio e tem a função de complementar beneficemente a granulometria do solo, além de tornar perene a resistência dos solos, aumentando seu ISC (Índice de Suporte Califórnia), reduzindo a plasticidade e a expansão por atuar como agente cimentante das partículas (DYNABASE, 2023).

Relevância e justificativa da pesquisa

A necessidade de avaliar os solos da região Nordeste por meio da sistemática MCT auxilia na catalogação de solos tropicais. Além disso, a análise da eficiência do estabilizante químico, que até o momento, tinha sido testado em solos das regiões Sul-Sudeste motivou o desenvolvimento desta pesquisa. Assim, o presente trabalho pode ser o início do desenvolvimento de uma nova alternativa de estabilização química dos solos no estado de Sergipe, além de outros aditivos já conhecidos como a cal, cimento Portland, betume e polímeros.

Objetivos

Objetivo geral: Analisar o comportamento de dois solos provenientes da região leste do estado de Sergipe quando puros e estabilizados quimicamente com Dynabase, tomando como referência os ensaios da metodologia MCT.

Objetivos específicos:

- conhecer o comportamento do solo puro segundo a metodologia MCT;
- verificar se com o uso do estabilizante químico, nos teores utilizados (3% e 5%) houve alterações nos resultados de granulometria e resistência em comparação ao solo puro;
- definir com os teores utilizados em quais camadas de pavimentos podem ser utilizados o solo em questão, levando em consideração a plasticidade e o índice de suporte Califórnia.

Estrutura deste trabalho de conclusão de curso

A estrutura do presente trabalho possui a seguinte sequência de divisão:

- **Introdução**, em que são abordados o tema de estudo, a justificativa e os objetivos;
- **Revisão Bibliográfica**, em que são descritos os assuntos relacionados ao tema abordado, como solos tropicais, classificação MCT e estabilização de solos;

- **Materiais e métodos**, que indica os materiais utilizados e o programa experimental, descrevendo quais ensaios foram utilizados para a confecção do trabalho;
- **Resultados e Discussões**, onde são expostos os resultados dos ensaios e suas discussões;
- **Conclusões e Sugestões**, são apresentadas as considerações finais sobre o tema, de acordo com os resultados obtidos, além de sugestões para trabalhos futuros.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

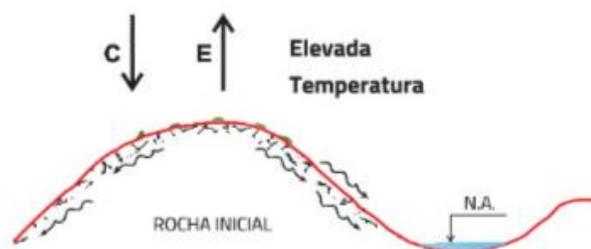
Nesse capítulo serão realizadas considerações a respeito dos solos tropicais, a classificação MCT e o uso dos solos tropicais em camadas de pavimentos. Além disso, será tratado sobre a estabilização de solos, seus tipos, o uso de produtos como estabilizantes químicos, trazendo a eficiência de cada um e comparando os seus resultados com os estudos existentes sobre o produto comercial Dynabase.

1.1 SOLOS TROPICAIS

Solos tropicais são aqueles que apresentam diferenciação em suas propriedades e em seu comportamento em comparação aos solos não tropicais, em decorrência da atuação nos mesmos de processos geológicos e/ou pedológicos, típicos de regiões tropicais úmidas (NOGAMI e VILLIBOR, 1995, pg. 6) que geram solos com propriedades e comportamentos geotécnicos singulares.

Segundo Mitchell e Sitar (1982), a região denominada intertropical apresenta condições climáticas favoráveis ao intemperismo intenso e rápido com chuvas abundantes (C) e altas temperaturas (E), conforme demonstrado na Figura 1. Tais condições são favoráveis para que ocorra o processo físico-químico, denominado laterização, que se caracteriza pela decomposição de feldspatos e de minerais ferromagnesianos, pela lixiviação da sílica e pela concentração de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio que constituem a maior diferença mineralógica entre os solos tropicais e os solos não tropicais.

Figura 1:Esquema simplificado da formação pedogenética dos solos tropicais.

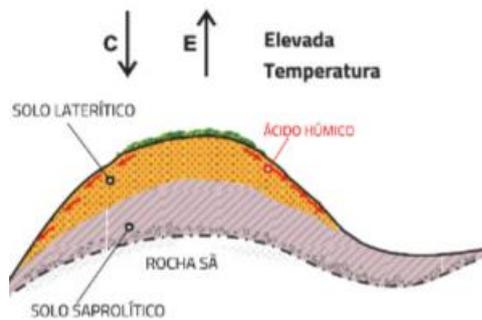


Fonte: Villibor e Alves (2019).

De acordo com Nogami e Villibor (1995), para que um solo seja considerado tropical, além do fator geográfico, ou seja, se formar em região de clima tropical úmido, há a necessidade de que se atenda a alguns critérios geotécnicos, obtidos através do intemperismo físico e químico, ao qual sofrem durante a formação da sua estrutura.

Segundo Nogami e Villibor (1995), os solos lateríticos e saprolíticos são as duas grandes classes destacadas entre os solos tropicais. Conforme ilustrado na Figura 2, solos lateríticos (later, do latim: tijolo) é um tipo de solo superficial de perfis bem drenados, enquanto que os solos saprolíticos (sapro, do grego: podre) são aqueles que resultam da decomposição e/ou desagregação “in situ” da rocha matriz pela ação das intempéries (chuva, insolação, geadas) mantendo ainda a estrutura da rocha que lhe deu origem.

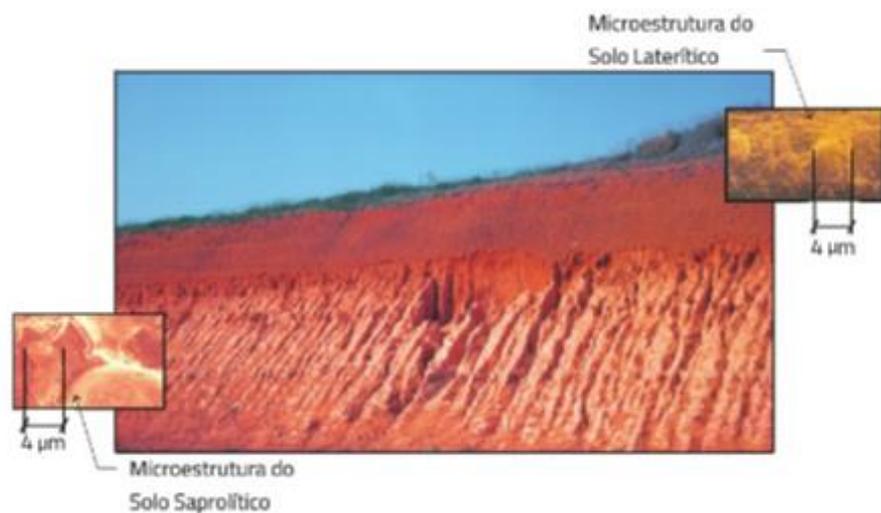
Figura 2: Designação genética geral das camadas de solos, nas regiões tropicais.



Fonte: Villibor e Alves (2019).

Nogami e Villibor (2009) citam que os solos tropicais apresentam coloração típica nas tonalidades de vermelho, amarelo, marrom e alaranjado, conforme a Figura 3, devido a presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. As principais diferenças mineralógicas entre os dois tipos de solos tropicais consistem no tipo de argilomineral mais abundante na fração argila e no nível de presença de óxidos, hidróxidos de ferro e alumínio em cada um.

Figura 3: Corte rodoviário, com camada laterítica sobrejacente à camada saprolítica de origem sedimentar, com as correspondentes microestruturas.



Fonte: Villibor e Alves (2019).

Nos solos lateríticos, há a caulinita como argilomineral mais abundante na fração argila, envolvidos por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio enquanto que, nos solos saprolíticos além da caulinita, também há a presença de argilominerais mais ativos como a illita e a montmorilonita, além disso, a presença de óxidos e hidróxidos

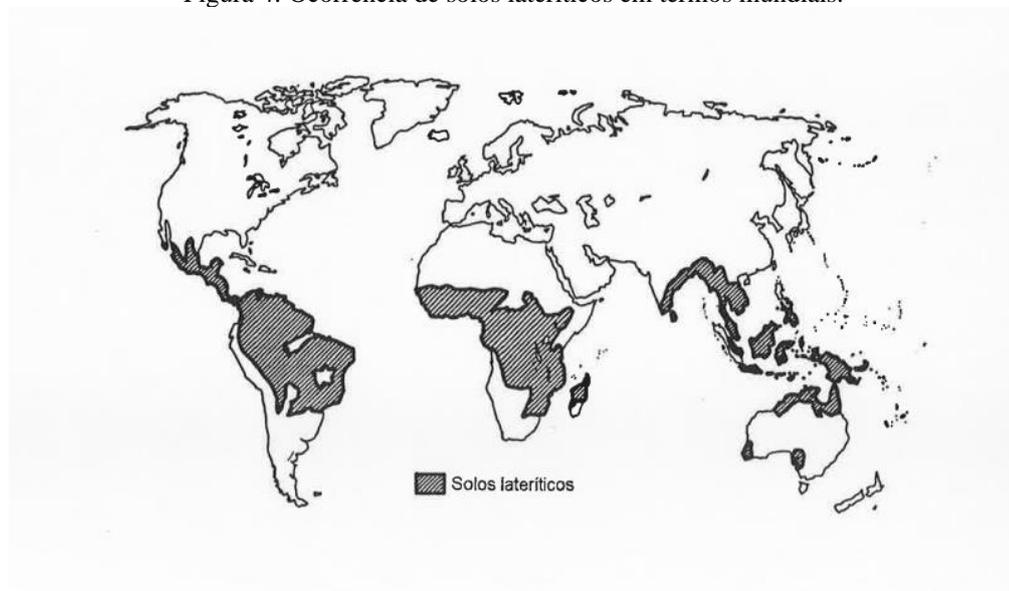
de ferro e alumínio é menor, não chegando a recobrir os argilominerais. (VILLIBOR e ALVES, 2019, págs. 30 - 31).

Com posse dessas informações, é possível concluir que os solos lateríticos por apresentarem maior uniformidade do argilomineral, em sua maior parte, constituído pela caulinita, são mais maduros, ou seja, já passaram pela ação do intemperismo por mais tempo, e assim, são mais usuais, para fins de pavimentação, que os saprolíticos, conforme demonstrado nas microestruturas presentes na Figura 3. Por essa razão, será o tipo de solo principal para o estudo em questão visto a sua importância para o tema proposto.

Segundo Godoy e Bernucci (2000), os solos ditos lateríticos na engenharia, são aqueles que quando devidamente compactados, ao perderem umidade adquirem condição de baixa perda de resistência ou nenhuma perda, mesmo na presença posterior de água, apresentando em estado natural, menor susceptibilidade à erosão, quanto maior for o grau de laterização.

Segundo Uehara (1982) *apud* Bernucci (1995), calcula-se que os solos lateríticos ocupem cerca de 8,1% da superfície dos continentes. Se os solos lateríticos se concentrassem somente na faixa intertropical que compreende a faixa do planeta situada entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, eles recobririam cerca de 21% desta área, tal ocupação é demonstrada na Figura 4.

Figura 4: Ocorrência de solos lateríticos em termos mundiais.



Fonte: Charman (1988) *apud* Souza (2022)

No Brasil, os solos lateríticos estão presentes em quase todo o território, em camadas superficiais do horizonte pedológico, com espessuras de ocorrência que variam desde a ordem de dezenas de centímetros até cerca de 10 metros (VILLIBOR e ALVES, 2019, pg. 32).

A distribuição dos solos lateríticos no Brasil é demonstrada na Figura 5.

Figura 5: Ocorrências de solos finos arenosos e argilosos lateríticos, no Brasil.



Fonte: Villibor e Nogami (2009)

Sendo assim, ao analisar o comportamento dos solos tropicais para o uso em camadas de pavimentos, tomando como referência os critérios das normas tradicionais rodoviárias, como HRB (Highway Research Board) e a USCS (Unified Soil Classification System), ao qual são aplicadas para solos de clima temperado, os solos tropicais são classificados como material de má qualidade, pois não atendem alguns critérios de tais normas. Tal equívoco causam grandes prejuízos, com a classificação de um solo de boa qualidade como bota-fora, gerando custos desnecessários.

Segundo Nogami e Villibor (1995), as propriedades peculiares que os solos tropicais apresentam são relacionadas ao CBR (California Bearing Ratio), a expansão, a perda de massa por imersão e a classificação específica, denominada Classificação MCT.

1.2 CLASSIFICAÇÃO MCT

Segundo Balbo (2007), diante da necessidade de se obter uma classificação para os solos tropicais, Villibor, no ano de 1981, propôs uma sistemática para aplicação em estudo geotécnico de bases de pavimentos, norteada pelas propriedades mecânicas e hidráulicas, a partir de ensaios desenvolvidos por Nogami.

Para a obtenção do comportamento do solo em estudo, utiliza-se um programa de ensaios, denominado Mini-MCV e perda de massa por imersão para determinação de coeficientes c' , d' e os valores de P_i , que permitem a obtenção do índice de laterização e' e por fim, a definição do comportamento do solo, sendo laterítico ou não.

Segundo Nogami e Villibor (1995), o coeficiente c' correlaciona-se com o comportamento granulométrico do solo na qual refere-se ao coeficiente angular da parte mais inclinada e retilínea através do ensaio de compactação Mini-MCV. Além disso, segundo Costa (2006), o índice c' refere-se à propriedade de compressibilidade do solo, além de estar relacionada com a coesão e , conseqüentemente, com a contração da perda de umidade.

O coeficiente d' é definido como a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação, correspondente a energia de 12 golpes na compactação Mini-MCV. Possui valores característicos a depender do tipo de material, para areias finas argilosas podem ultrapassar 100, maior que 20 para argilas lateríticas, próximo de 10 para argilas não lateríticas e para areias puras apresentam valores inferiores a 10. (NOGAMI e VILLIBOR, 1995, pg. 69)

Segundo a DNER-ME 259/96, norma que padroniza o ensaio Mini-MCV, o coeficiente P_i é o valor da perda de massa por imersão. Ele é determinado com base nas alturas do corpo de prova, que se relaciona com a densidade do material, e conseqüentemente, com o valor de Mini-MCV. Segundo Costa (2006), o índice caracteriza o potencial à expansão e a perda de coesão e de resistência após imersão em água.

O coeficiente e' é obtido por meio do equacionamento que relaciona a perda de massa por imersão (P_i) e o coeficiente d' .

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}}$$

Onde: P_i – Perda de massa por imersão (%);

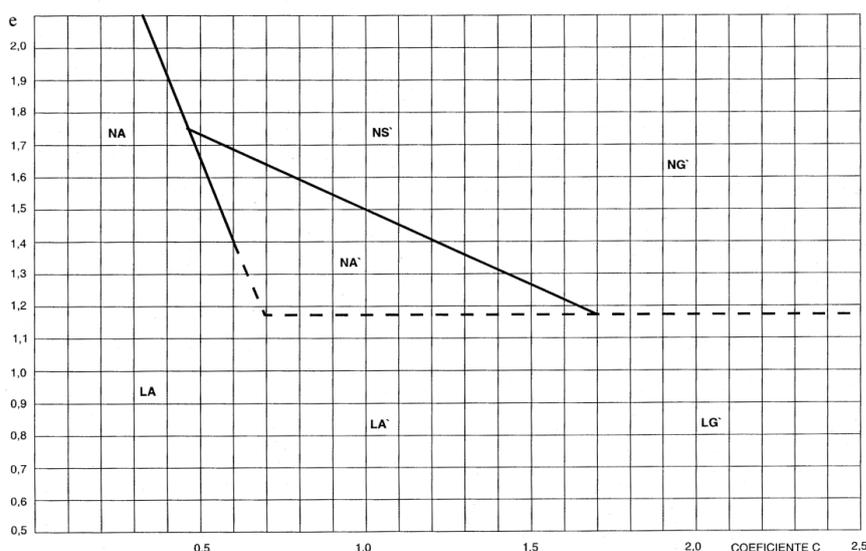
d' – coeficiente de compactação Mini-MCV;

Com essa correlação, é possível analisar no quadro de classificação de solos tropicais, o comportamento que o solo estudado possui, ou seja, se o mesmo apresenta comportamento laterítico ou não, através da classificação MCT.

A classificação designada como MCT engloba os solos em duas classes, uma de comportamento laterítico (classe L) e outra de não-laterítico (classe N). Essas classes são subdivididas de acordo com a granulometria do solo, resultando em sete grupos, sendo três grupos da classe laterítica e quatro da classe não-laterítica.

De acordo com Nogami e Villibor (1995), a separação dos solos com comportamento laterítico (L) são arenosos (LA), areno-argilosos (LA'), argilosos (LG') e os de comportamento não-laterítico (N) são arenosos (NA), areno-argilosos (NA'), siltosos (NS') e argilosos (NG'), conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6: Classificação de solos segundo a metodologia MCT.



Fonte: DNER 259/96

Costa (2006) define cada subclasse e traz comentários relevantes descritos a seguir:

- **LA** – Areias com poucos finos lateríticos: apesar de possuírem elevada capacidade de suporte e módulo de resiliência relativamente elevado, podem ser permeáveis, mesmo quando devidamente compactadas, além de pouco coesivos e pouco contráteis quando secas.
- **LA'** – Solos areno-argilosos lateríticos: em condições naturais possuem baixa massa específica aparente seca, baixa capacidade de suporte e podem ser colapsíveis por imersão em água.
- **LG'** – Argila e argilas arenosas lateríticas: quando mais arenosas assemelham-se aos solos de grupo LA', todavia com menores resultados de capacidade de suporte, maior plasticidade, maior umidade ótima e menor massa específica aparente. Pode ser colapsível, em estado natural, principalmente quando possuem agregados bem desenvolvidos.
- **NA'** – Areias quartzosas: os tipos mais representativos são solos saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo tais como granitos, gnaisses, arenitos e quartzitos impuros, cujos finos têm comportamento não laterítico. A quantidade e a natureza dos finos podem determinar comportamento altamente expansivo, muito resiliente ou susceptível à erosão hidráulica. Contudo, quando areia é bem graduada e os finos enquadram nas exigências tradicionais, os solos NA' podem apresentar propriedades adequadas para uso até em bases de pavimentos.

- NS' – Solos silto-arenosos saprolíticos: em suas condições naturais apresentam normalmente baixa massa específica aparente seca, baixa capacidade de suporte, erodibilidade média a elevada e podem ser colapsíveis. Quando compactados na umidade ótima e massa específica aparente seca da energia normal, apresentam baixa capacidade de suporte, após imersão em água, baixo módulo de resiliência, elevada erodibilidade, elevada expansibilidade e média permeabilidade.
- NG' – solos argilosos saprolíticos: apresentam características das argilas tradicionais, tais como: elevadas expansibilidades, plasticidade, compressibilidade e contração, quando submetido à secagem, o que torna proibitivo seu uso em obras rodoviárias.

Segundo Gisandra *et al.* (2020), Vertamatti, ano de 1988, propôs uma modificação na classificação MCT de modo a incluir uma faixa de solos entre os de Classe L e N, chamados de transicionais T. Tal mudança surgiu da existência de certos solos que não são lateríticos, porém também não são saprolíticos, ou seja, um meio-termo entre as características de solos maduros, provenientes dos solos lateríticos e características da rocha-mãe, característicos de solos saprolíticos.

Segundo Bernucci (1995), os solos que apresentam grande potencialidade de uso em pavimentos são as areias argilosas LA', conhecidas como SAFL – Solo arenoso fino laterítico e as argilas lateríticas de classes LG'.

Segundo Nogami e Villibor (1995), em 1988, a sistemática MCT foi oficializada pelo Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP), alavancando o estudo geotécnico dos solos tropicais e acelerando a implantação de pavimentos econômicos no país.

Para as rodovias vicinais, ruas de pequena intensidade de tráfego, como conjuntos habitacionais, pequenas comunidades e bairros periféricos, a pavimentação tradicional pode, em muitos casos, ter um custo que a torna inviável. Em contraposição, uma pavimentação alternativa, por exemplo, com uso de solos lateríticos, ou seja, pavimento de baixo custo com estrutura que admita ser reforçada no futuro, representa uma proposta muito interessante. (Villibor *et al.* (2000) *apud* Costa (2006), pg. 9).

1.3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O dicionário Aurélio define a palavra estabilização como a ação de estabilizar, ou seja, dar ou obter estabilidade, equilíbrio. Sendo assim, estabilização de solos é o ato ou efeito de realizar alguma ação com o objetivo de melhorar ou transformar as características geotécnicas do solo em questão para torná-lo utilizável para seu devido fim.

Atualmente, a estabilização de solos tem sido um tema bem debatido no âmbito acadêmico e profissional. A busca pelo melhor aproveitamento dos solos compreende dois

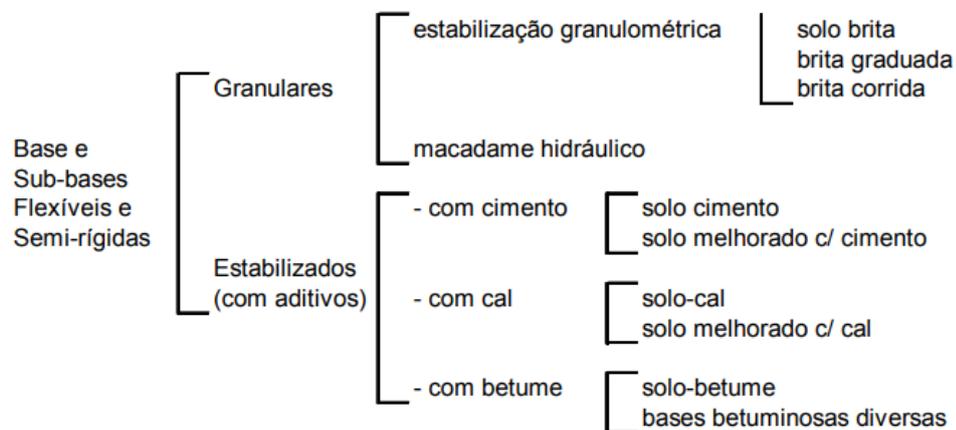
pilares da engenharia civil: a redução de custos e a sustentabilidade. A redução de custos compreende a necessidade do bota-fora, a compra de materiais em jazidas e a questão sustentável diz respeito a exploração desenfreada de áreas naturais que possuem potencial presença de materiais de boa qualidade para fins de pavimentação.

Dentre as características que um solo deve apresentar para que seja utilizado, segundo Senço (2001), se destaca a resistência ao cisalhamento e a resistência a deformação. A resistência ao cisalhamento diz respeito a máxima tensão de cisalhamento que o pavimento pode suportar sem romper. A resistência à deformação diz respeito às cargas verticais dos veículos aplicadas no pavimento, ou seja, o quão deformável a camada do pavimento pode ser sem que ocorra a ruptura.

A análise de parâmetros oriundos dos ensaios relativos à plasticidade, como os limites de Atterberg, e resistência, como o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), auxiliam na definição da camada para a qual determinado solo estabilizado pode ser utilizado.

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (BRASIL, 2006), para que seja utilizada em camadas de base e sub-base, demonstrado na Figura 7, o solo pode ser estabilizado de duas maneiras: granulométrica e química.

Figura 7: Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas.

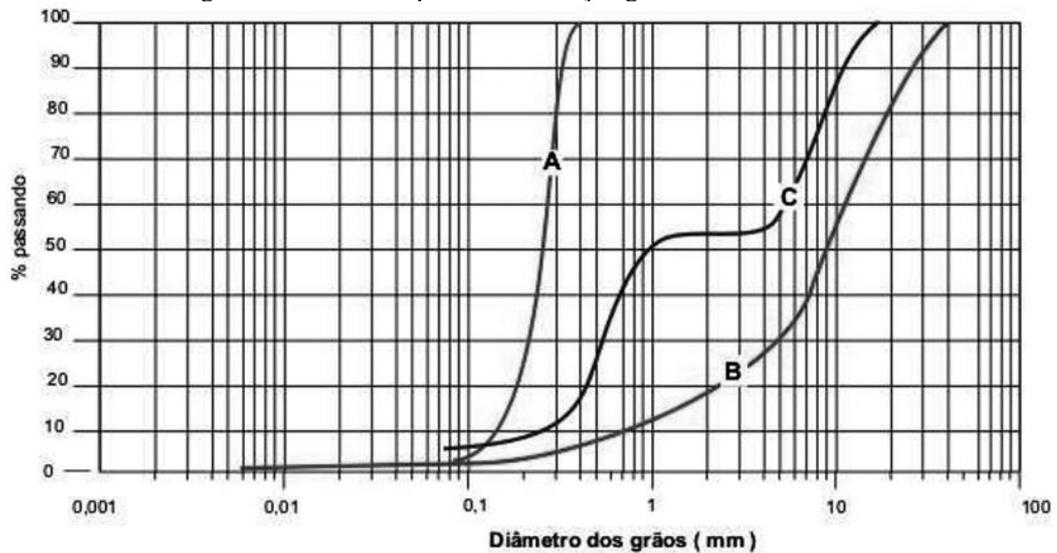


Fonte: BRASIL (2006)

1.3.1. Estabilização granulométrica

O solo é composto por frações granulométricas que se classificam segundo o tamanho das suas partículas em pedregulho, areia, silte e argila. Ao realizar o ensaio de análise granulométrica é possível a determinação da porcentagem de cada fração, e assim, construir a curva granulométrica do solo. Os diferentes tipos de distribuição granulométrica são demonstrados na Figura 8.

Figura 8: Diferentes tipos de distribuição granulométrica.



Fonte: Suporte Solos (2023)

A curva A indica um solo com granulometria uniforme que se caracteriza pela presença de uma fração granulométrica predominante, representado pela pequeno intervalo entre os diâmetros dos grãos do solo; a curva B, um solo contínuo que apresenta uma melhor proporção entre as frações granulométricas e a curva C, uma granulometria descontínua que se caracteriza pela ausência de determinada fração representada pela linha horizontal da curva.

Destas representações dos três tipos de solo, aqueles semelhantes às curvas A e C carecem de uma estabilização granulométrica para uma melhor utilização, por exemplo, como camadas do pavimento. Entretanto, a curva B já apresenta uma composição granulométrica mais bem distribuída, em que os vazios deixados pelos grãos maiores são preenchidos pelos grãos intermediários; já os vazios deixados por estes grãos, são preenchidos pelos grãos menores.

A estabilização granulométrica proporciona o aumento da massa específica aparente seca máxima e redução da umidade ótima obtidos nos ensaios de compactação, por meio do preenchimento dos vazios e conseqüentemente, aumento na resistência retratado no Índice de Suporte Califórnia (ISC).

Segundo Santos (2009), para que os materiais possam ser utilizados na pavimentação em camadas de sub-base e bases estabilizadas granulometricamente, os mesmos devem em sua granulometria, se enquadrar em faixas granulométricas pré-definidas. Tal necessidade indiretamente está relacionada aos índices físicos dos solos (IG = índice de grupo, LL = Limite de Liquidez e LP = Limite de Plasticidade).

A DNIT 139/2010 trata sobre as especificações de serviço para fins de pavimentação, de sub-base estabilizada granulometricamente. No ensaio de caracterização, deve-se obter o índice de grupo igual a 0 e os materiais retidos na peneira nº 10 (2 mm) não tenha presença de matéria orgânica. Além disso, no ensaio de obtenção do Índice de Suporte Califórnia, deve-se obter valores maiores que 20, além de expansão menor que 1%. Se tratando de solos lateríticos, a norma permite que possua índice de grupo diferente de zero e expansão maior que 1%, desde que apresente valor inferior a 10% no ensaio de expansibilidade.

A DNIT 141/2010 trata sobre as especificações de serviço para fins de pavimentação, de base estabilizada granulometricamente. No ensaio de caracterização, devem possuir composição granulométrica que satisfaça a uma das faixas, demonstrada na Tabela 1, de acordo com o número N de tráfego.

Tabela 1: Faixas granulométricas.

Tipos	Para N > 5 X 10 ⁶				Para N < 5 X 10 ⁶		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT 141/2010

A fração fina que passa na peneira nº 40 (0,42mm) deve apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 25%, e índice de plasticidade máximo de 6%, a porcentagem que passa na peneira nº 200 (0,075 mm) não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº 40 (0,42 mm). No ensaio de obtenção do índice de Suporte Califórnia, o solo estabilizado deve apresentar valores maiores que 60% para tráfego leve e 80% em tráfego pesado e expansão menor que 0,5%.

O BRASIL (2006) define que os materiais que são utilizados para camadas de base e sub-base estabilizada granulometricamente são misturas de material natural e pedra britada

conhecido como solo-brita ou só os materiais da britagem conhecido como brita graduada ou brita corrida. Com isso, percebe-se uma dependência dos recursos naturais para a execução das camadas de base e sub-base por meio da estabilização granulométrica, daí, surge a outra alternativa, conhecida como estabilização química.

1.3.2. Estabilização Química

Segundo Malanconi (2013), a estabilização química consiste em melhorar as características estruturais e geotécnicas do solo natural através do uso de aditivos, fazendo com que, após os procedimentos de mistura, compactação e cura, possam ser utilizados em camadas de pavimentos, principalmente, em camadas de base. O autor ainda comenta que essa estabilização surgiu da necessidade de se realizar pavimentação em locais que não possuíam materiais britados disponíveis a custo acessível.

Segundo Santos (2009), a estabilização química, quando utilizada para solos granulares, promove principalmente a melhoria da resistência ao cisalhamento, devido ao atrito produzido pelos contatos das superfícies das partículas, por meio de adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Nos solos argilosos, onde encontram as estruturas floculadas e dispersas, são mais sensíveis à presença de água e ao ser incorporado algum aditivo químico, o mesmo atua impermeabilizando as partículas e influenciando fortemente na resistência ao cisalhamento.

Segundo França (2003), na literatura, há uma série de aditivos químicos utilizados como estabilizantes de solos, podendo ser desde produtos industrializados até subprodutos ou resíduos industriais. De acordo com Sherwood (1993), o efeito dos agentes estabilizantes é o que classifica cada um deles em impermeabilizantes ou aglutinantes.

Os agentes impermeabilizantes evitam que a água penetre no solo, mantendo um baixo teor de umidade no mesmo, gerando um aumento na resistência. Os aglutinantes, por sua vez, geram efeitos de cimentação nas partículas do solo, reduzindo a absorção de água em menor escala em comparação aos agentes impermeabilizantes.

BRASIL (2006) cita que os principais aditivos químicos utilizados para a estabilização de solos no uso de camadas de base e sub-bases são a cal, o cimento Portland e os materiais betuminosos. Além disso, tem crescido o uso de estabilizantes comerciais como o Dynabase.

1.3.2.1. Estabilização Química com cal

A utilização da cal como agente estabilizante de solos tem crescido devido a sua eficiência e baixo custo na aplicação, em comparação com outros estabilizantes químicos. Segundo Souza (2022), os tipos de cal utilizada no solo para fins de pavimentação são cal

hidratada com alto teor de cálcio, cal monohidratada dolomítica, cal virgem calcítica e cal dolomítica, sendo os teores mais comuns empregados entre 5% e 10%.

Segundo Lovato (2004), quando se adiciona cal a um solo fino em presença de água, ocorre simultaneamente algumas reações químicas. A estabilização química com cal é caracterizada por duas etapas, uma etapa inicial rápida como a troca catiônica, floculação-aglomeração e adsorção de cal que pode durar de horas a dias. Enquanto que, a reação mais lenta caracteriza-se pela reação pozolânica, que proporciona um aumento da resistência, daí a necessidade do tempo de cura.

Tais reações processam-se em presença de umidade, quando a cal reage com a sílica ou com o óxido de alumínio, resultando em modificações que podem estabilizar o solo, reduzindo sua expansão e possibilitando o uso em camadas de pavimentos, principalmente como reforço de subleito ou até mesmo, como sub-base.

De acordo com Sartori (2015), a cal pode ser aplicada de diversas maneiras, sendo as mais conhecidas, o solo melhorado com cal e solo estabilizado com cal. Segundo Azevedo (2010), o solo melhorado com cal é utilizado quando se busca somente melhorar algumas propriedades dos solos consideradas prejudiciais, para fins de pavimentação, se destacam a expansibilidade, umidade excessiva e plasticidade elevada. Azevedo (2010) ainda cita que o solo estabilizado com cal é utilizado quando há necessidade um incremento estrutural, ou seja, aumento da resistência para proporcionar a obtenção de parâmetros de utilização do determinado solo em camadas de base.

1.3.2.2. Estabilização Química com Cimento Portland

O processo de estabilização química de solos com o uso do cimento Portland é uma alternativa muito utilizada no dia a dia nas obras de pavimentação. Segundo Santos (2009), o processo de estabilização do solo com o cimento Portland ocorre a partir do desenvolvimento das reações químicas que são geradas na hidratação do cimento e na reação entre os argilominerais e a cal liberada desse processo.

O BRASIL (2006) trata sobre o desenvolvimento de bases e sub-base flexíveis e semirrígidas estabilizadas com aditivos, a partir dos teores de cimento que são utilizadas para a realização da estabilização química de solos. As normas 142/2022 e 143/2022 tratam sobre base de solo melhorado com cimento e solo-cimento, respectivamente, trazem a diferença de teor entre solo-cimento e solo melhorado com cimento. Sendo assim, para o melhoramento de solos são utilizados teores de 2% a 4%, já para o solo-cimento estes variam entre 5% e 8%.

Segundo Bernucci *et al* (2022), a faixa viável de uso de cimento para estabilização de solos é de 5% a 9% em relação a massa total. O autor cita essa faixa como a ideal, pois a

depende da plasticidade do solo natural, pode tornar a estabilização com cimento muito caro. Com essa observação, pode-se perceber a necessidade de se realizar em alguns casos os dois tipos de estabilização.

Primeiramente, a estabilização granulométrica com o objetivo de tornar a curva granulométrica contínua, ou seja, reduzir a diferença de proporção entre as partes constituintes do solo em estudo. Após isso, utiliza-se a estabilização química com o objetivo de reduzir a plasticidade do solo e aumentar sua resistência mecânica.

Com o objetivo de demonstrar a comparação de resultados entre o solo puro de comportamento laterítico, solo estabilizado granulometricamente e quimicamente, Rocha e Rezende (2017) estudaram a mistura realizada na obra (78% de cascalho, 20% de areia e 2% de cimento) e as misturas do cascalho laterítico com 2, 4 e 6% de cimento e cal hidratada, os parâmetros geotécnicos obtidos através dos ensaios são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados obtidos nos ensaios de compactação, ISC, expansão, índice de vazios na umidade ótima.

DOSAGEM	C	C + 20%A+ 2%CI	C + 2%CI	C + 4%CI	C + 6%CI	C + 2%CA	C + 4%CA	C + 6%CA
AMOSTRA	1	2	3	4	5	6	7	8
$w_{ót}$ (%)	11,1	9,8	12,7	11,7	12,4	11,7	12,7	12,6
$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	21,30	21,50	21,10	21,00	20,70	20,70	20,30	20,00
e	0,37	0,36	0,38	0,39	0,41	0,41	0,44	0,46
ISC $w_{ót}$ (%)	32	144	97	300	260	50	54	48
Expansão (%)	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02

Obs.: C = Cascalho; A = areia; CI = cimento; CA = cal; $w_{ót}$ = umidade ótima; $\gamma_{dmáx}$ = peso específico aparente seco máximo; e = índice de vazios; ISC = Índice de Suporte Califórnia.

Fonte: Rocha e Rezende (2017)

Inicialmente, ao comparar os valores do cascalho laterítico puro com a mistura realizada na obra, pode-se perceber o aumento significativo dos valores de ISC (Índice de Suporte Califórnia) e a redução da umidade ótima. Tal resultado demonstra a importância da estabilização granulométrica, pois o teor de cimento aplicado é pequeno comparado ao de areia, e ao analisar os valores de ISC e o do peso específico seco máximo entre a amostra estabilizada granulometricamente e o cascalho puro com a adição de 2% de cimento, percebe-se uma diferença significativa entre os valores.

Ao analisar o cascalho laterítico puro com a incorporação do cimento e cal, percebe-se o aumento proporcional da resistência com o aumento dos teores de cimento e cal 2% a 4%.

Porém, ao aumentar o teor de cimento e cal para 6% é perceptível a queda no valor do ISC. Tal fato, segundo os autores, pode indicar que exista um teor ótimo de estabilizante químico para ser utilizado em amostras de solos.

Além disso, ao analisar a comparação entre o comportamento mecânico dos materiais que foram utilizados na base do trecho estudado, composto pelo cascalho laterítico, areia e

cimento e a estabilização do cascalho laterítico com cimento, percebe-se que ocorreu um aprimoramento das propriedades geotécnicas através da estabilização química. Tal fato foi perceptível, através da redução da expansão, a sensibilidade à água compreendida pelo aumento dos valores de umidade ótima com o aumento do teor de cimento e o aumento da resistência compreendida pelos valores de ISC, sendo apto a ser utilizado para camadas de base.

Porém, ao se analisar os resultados dos ensaios laboratoriais com o uso da cal, percebeu-se que houve um aumento tímido dos valores de ISC, ou seja, menor que o necessário para camadas de base, a expansão permaneceu a mesma e a umidade ótima aumentou em comparação ao solo puro. Com tais resultados, o cascalho laterítico estabilizado com cal não atende aos requisitos mínimos para serem utilizados como camadas de base em pavimentos.

1.3.2.3. Estabilização Química com Betume

Santos (2009) cita que o uso do betume para fins de estabilização química de solos possui finalidades distintas a depender do tipo de solo. Para solos com características arenosas, fornece coesão a mistura, para solos argilosos, tem o objetivo de impermeabilizar, tornando um bloqueio para a entrada de água durante a vida útil do pavimento.

Segundo Ferreira (1980), o betume começou a ser utilizado a partir da observação do comportamento do pavimento pelos engenheiros rodoviários, em regiões que haviam passagem de veículos que transportavam o petróleo, onde passavam percebiam a redução do pó nas estradas de terra, daí surgiu a ideia da estabilização betuminosa.

Santos (2009) estudou o comportamento de três amostras de solos do estado de Sergipe, “in natura”, inicialmente, e em posse dos resultados obtidos, realizou misturas nos diferentes teores de 2% a 8% do ligante asfáltico, com o objetivo de analisar as mudanças que os diferentes teores de emulsão produzem nas propriedades dos solos em questão. Os resultados dos ensaios de caracterização física, assim como, a sua classificação, estão demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3: Informações da análise granulométrica; Índices de Consistência e Classificação de Solos.

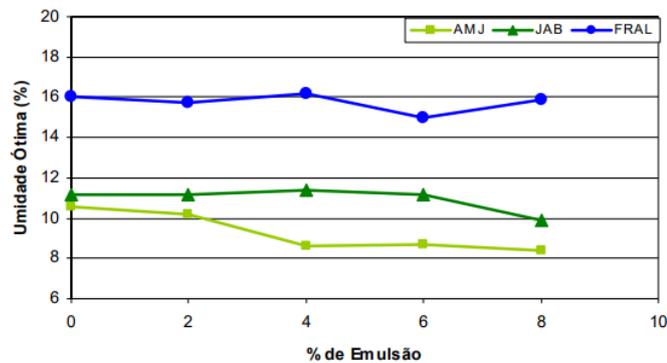
Solo	Composição Granulométrica				W _L (%)	I _p (%)	IG	Classificação AASHTO/TRB	Classificação USCS
	(%)% que passa nas peneiras								
	# 4	# 10	# 40	# 200					
AMJ	99,0	97,5	57,5	17,5	NL	NP	0	A-2-4	SM
JAB	99,6	98,0	82,5	39,0	22	7	1	A-4	SC-SM
FRAL	100,0	100,0	99,5	92,5	46	25	15	A-7-6	CL

Fonte: Santos (2009)

Para isso, realizou os ensaios de compactação, resistência a compressão simples e a tração por compressão diametral, ISC e módulo de resiliência. Para o presente trabalho, será demonstrado somente os resultados da compactação e ISC.

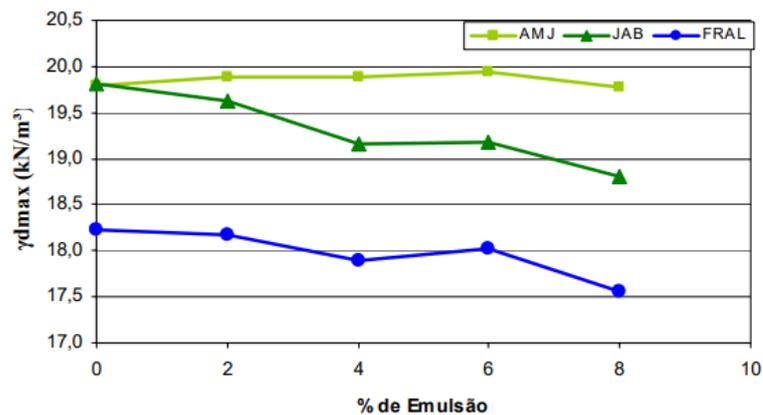
Ao analisar os resultados dos ensaios de compactação demonstrados nas Figuras 9 e 10, percebe-se que, para as três amostras de solos, houve a redução da umidade ótima e peso específico ao aumentar o teor de ligante aplicado ao solo puro. Tal fato, foi mais perceptível no solo A-4, devido a sua granulometria ser a mais variada, possibilitando a coesão e a impermeabilização através do uso do ligante.

Figura 9: Relação entre os valores da Wot e o teor de emulsão.



Fonte: Santos (2009)

Figura 10: Relação entre os valores de peso específico máximo e o teor de emulsão.



Fonte: Santos (2009)

Para o ISC, os corpos de prova foram ensaiados nas condições sem cura e com cura, respeitando os quatro dias de imersão conforme norma, os resultados dos ensaios estão exibidos na Tabela 4. Os resultados comprovam, de acordo com Gondim (2008), que os ensaios de ISC não são adequados para a verificação do comportamento de misturas estabilizadas quimicamente.

Tabela 4: Valores de teor ótimo de emulsão e máximos de ISC obtidos para misturas asfálticas.

Solo	Sem Cura		Com Cura	
	T _{ót} em (%)	ISC (%)	T _{ót} em (%)	ISC (%)
AMJ	2,0 ^(*)	51	2,0 ^(*)	62
JAB	2,0 ^(*)	18	2,0 ^(*)	22
FRAL	2,0	11	2,0	13

Fonte: Santos (2009)

Ao analisar a Tabela 4 e os valores do ISC, percebe-se que o solo AMJ apresentou valor superior para a utilização em bases estabilizadas granulometricamente para rodovias com baixo volume de tráfego, de acordo, com a DNIT 141/2010, que possui ISC limite igual a 60%.

1.3.2.4. Estabilização Química com Dynabase

O Dynabase é um produto estabilizante químico a base de hidróxido de cálcio que, segundo a fabricante, possui densidade real do material solto variável, entre 1,10 g/cm³ e 1,20 g/cm³, a depender da umidade utilizada e gera efeitos impermeabilizantes e de cimentação e que podem ser utilizados na construção e manutenção de pavimentos.

Segundo Assunção (2012), o hidróxido de cálcio, principal componente do Dynabase é um composto organoclorado, formado através da reação química do cloro com o carbureto de cálcio.

A aplicação desse produto introduz novos parâmetros geotécnicos devido ao seu efeito aglutinante e estabilizante atuando nas partículas dos solos. Aumentando sua capacidade de suporte, reduzindo consideravelmente sua expansão, dispensando o uso de brita, cimento ou outros tipos de agregados na estabilização da camada tratada (DYNABASE,2023).

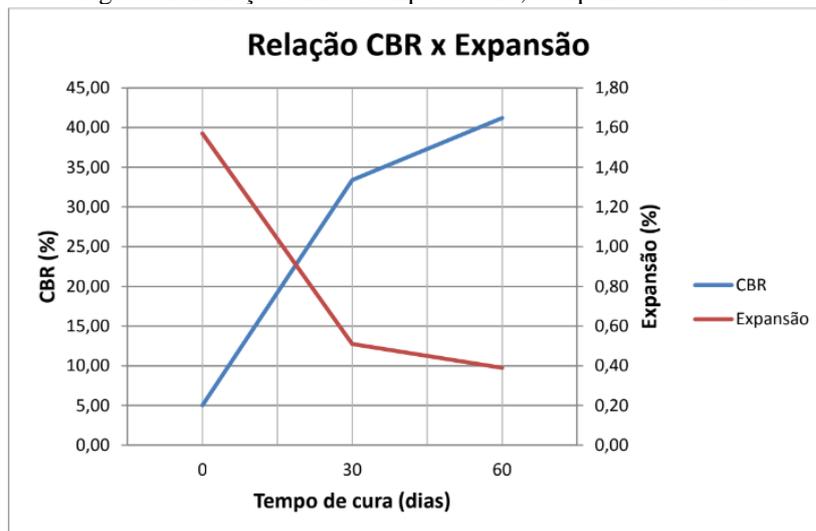
Com o objetivo de analisar a eficiência do estabilizante químico Dynabase, vários estudos estão sendo feitos no país, em sua grande maioria, se tratam de trabalho de conclusão de curso que auxiliarão no embasamento teórico para esse presente estudo (e.g. Assunção, 2012; Wollenschlager, 2019; Gomide, 2015; Junior, 2016; Alvim, Meira e Felix, 2020; Trzaskos e Orłowski, 2020).

Assunção (2012), por meio da análise da resistência do estabilizante químico na pavimentação em função do tempo de cura, realizou uma comparação entre o solo natural, classificado como silte-argiloso, com índice de plasticidade 20,5% e CBR de 5% e o mesmo solo com 2,2% de aditivo, tal teor foi adotado por tentativa e erro em virtude de não ter um método de dosagem padronizado para esse produto.

Foram moldados 3 corpos de prova para análise de resistência ao longo de dois meses, ensaiando-se um a cada 30 dias. Ao fim dos dois meses, foi possível a obtenção dos resultados demonstrados na Figura 11, em que se percebeu um aumento de 568% no valor do CBR para o corpo de prova rompido com 30 dias, saindo de 5% para 33,4% e um aumento de 724% em relação ao solo puro para o rompido em 60 dias, tendo o mesmo o valor de CBR igual a 41,2%.

Tais resultados comprovam o anunciado pelo fabricante, em que o produto não é afetado pela água e pode ser armazenado a céu aberto, o que oferece uma grande vantagem, pois não necessita de um local específico de armazenamento em obra e, caso haja chuva durante o processo de aplicação do produto, não haverá perda do material já incorporado ao solo (ASSUNÇÃO,2012, pg. 58).

Figura 11: Relação entre o tempo de cura, a expansão e o CBR.



Fonte: Assunção (2012)

Wollenschlager (2019) comparou os resultados obtidos pelos estudos envolvendo a expansão de três amostras de solo da Formação Palermo, presente no subleito de determinada obra. Tais amostras de solos se caracterizam pela predominância da fração argila, com comportamento plástico, apresentando variação volumétrica a depender da quantidade de umidade fornecida ao solo.

Para a análise da eficiência do aditivo, foi utilizada uma amostra de solo puro e variou os teores do aditivo, de 2 a 4%. Os resultados obtidos de expansão para a mistura solo-aditivo estão expostos na Tabela 5, forneceram conclusões positivas a eficiência do aditivo, variando de 5,98% para o teor de 2% até 1,63% para o teor de 4%.

Tabela 5: Relação entre o teor de Dynabase e a expansão.

Parâmetro	AM-03A	AM-03B	AM-03C
Mistura solo-Dynabase	2%	3%	4%
γ_{smax} (g/cm ³)	1,595	1,588	1,587
h_{ot} (%)	19,8	17,5	21,7
ISC (%)	3,3	9,4	24,7
Expansão (%)	5,98	4,31	1,63

Fonte: Wollenschlager (2019)

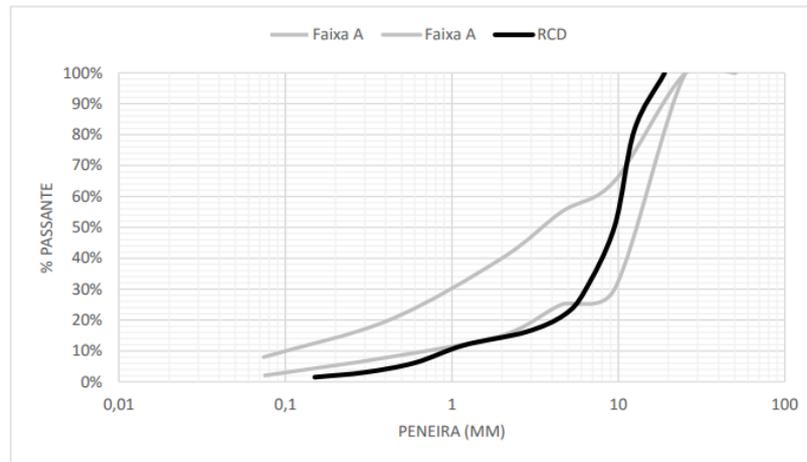
Gomide (2015) com o objetivo de determinar as propriedades físicas e mecânicas da mistura solo-RCD-aditivo químico Dynabase, realizou os ensaios geotécnicos de caracterização física, ensaios de compactação e a determinação do ISC em um solo classificado como areia argilosa com presença de silte.

Tal análise, além de descobrir outros materiais que possam substituir os recursos naturais que são geralmente utilizados para a composição de base de pavimentos, como as britas, ainda busca analisar a eficiência do Dynabase no que diz respeito ao beneficiamento pelo aditivo da fração fina da mistura.

Segundo Gomide (2015), o solo puro, de acordo com a classificação TRB (Transportation Research Board) classificou o solo como A-4, que não apresentam comportamento adequado para aplicação em pavimentos, visto que possuía material passante na peneira nº 200 (0,075 mm) superior a 2/3 retido na peneira nº40 (0,42 mm).

O resíduo de construção e demolição (RCD) não possuía curva granulométrica que se encaixava na faixa A, conforme demonstrado na Figura 12, devido à grande quantidade de material graúdo e poucos finos.

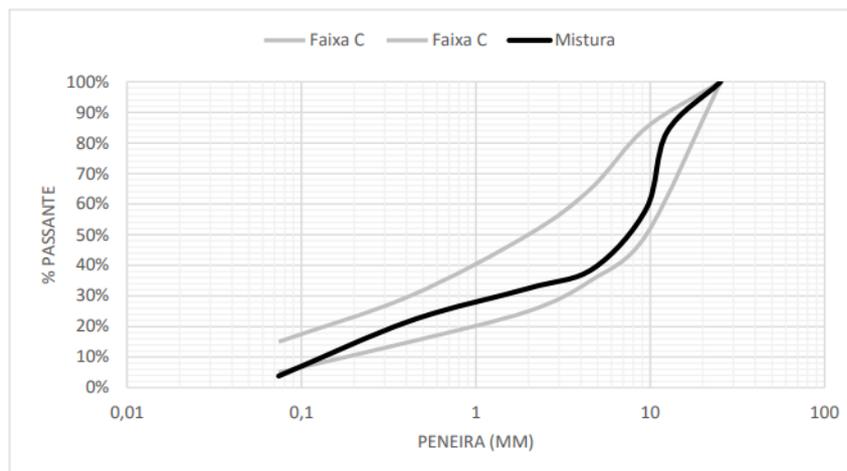
Figura 12: Curva granulométrica do RCD puro com a faixa granulométrica A.



Fonte: Gomide (2015)

Ao analisar a Figura 13, com a utilização de 2,2% de Dynabase, conseguiu suprir a insuficiência de finos, enquadrando a mistura na faixa C e o solo apresentou-se estabilizado granulometricamente, possibilitando o uso em base de pavimentos.

Figura 13: Curva granulométrica RCD-aditivo e faixa granulométrica C.



Fonte: Gomide (2015)

Junior (2016) com o objetivo de analisar a influência do aditivo para fins de estabilização química em solos provenientes de jazidas da região Norte do Brasil, especificamente dos estados do Acre e Rondônia, utilizou os teores de 1,5% e 3,0% do Dynabase.

Dentre os ensaios realizados em três amostras de solos com três teores de Dynabase (0%, 1,5% e 3,0%) destacam-se a redução dos valores de índice de plasticidade (IP) ao aumentar o teor de aditivo, como representado na Tabela 6. Tal redução provém do fato que o Dynabase atua como agente modificador das partículas do solo puro, alterando o diâmetro da fração fina do solo, como demonstrado no estudo de Gomide (2015).

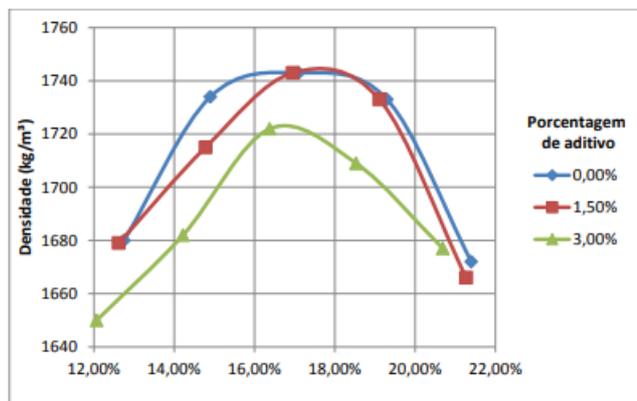
Tabela 6: Resultados do IP.
Resultados do Índice de Plasticidade (IP)

AMOSTRA/TEOR	0,00%	1,50%	3,00%
01	19,20	15,80	8,90
02	35,72	24,30	19,22
03	16,90	10,08	9,56

Fonte: Junior (2016).

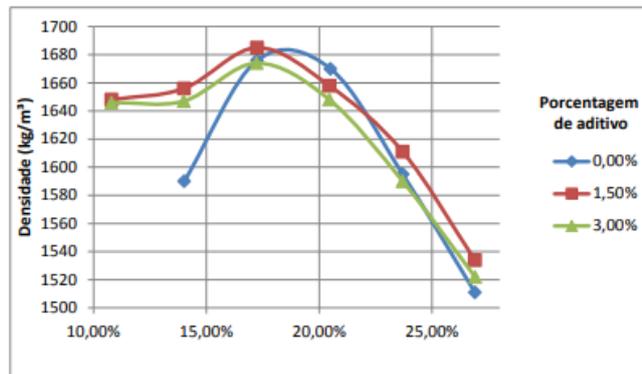
Além disso, nos ensaios de compactação realizados por Junior (2016), percebe-se que em duas das três amostras ensaiadas obteve uma redução da massa específica seca máxima com o aumento do teor de aditivo nas amostras 01 e 02, conforme demonstrada na Figuras 14 e 15, respectivamente.

Figura 14: Curvas de Compactação - Amostra 01.



Fonte: Junior (2016).

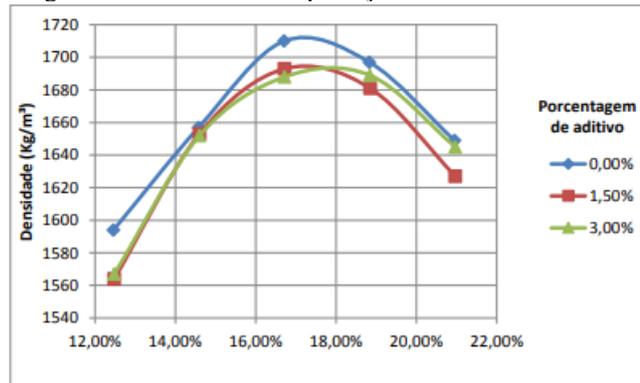
Figura 15: Curvas de Compactação - Amostra 02.



Fonte: Junior (2016).

Tal comportamento não aconteceu somente na amostra 03, onde o teor de 3,0% de aditivo possuía massa específica aparente seca máxima maior que a amostra utilizando o teor de 1,5% do aditivo, conforme a Figura 16.

Figura 16: Curvas de Compactação - Amostra 03.



Fonte: Junior (2016)

Alvim, Meira e Felix (2020) ao analisar três amostras de solo puro e com a adição de 2,2% e 3,0% de aditivo, percebeu que as amostras de solo ao qual foi utilizado o teor de 3,0% de aditivo obteve o aumento da MEAS, enquanto que a amostra com teor de 2,2% de aditivo houve uma redução ou constância no MEAS, conforme demonstrada na Tabela 7.

Tabela 7: Valores do MEAS

	Franca-SP		Aparecida de Goiânia-GO		Ponta Grossa-PR	
	SN	SN+3,0%	SN	SN+2,2%	SN	SN+3,0%
■ Densidade máxima seca(g/cm³)	1,913	1,929	1,691	1,665	1,485	1,485

Fonte: Alvim, Meira e Felix (2020).

Ao analisar os valores da umidade ótima, com o teor de 2,2% obteve-se um aumento na umidade ótima, porém com o teor de 3,0% do Dynabase, percebe-se uma redução ou constância conforme retratado na Tabela 8.

Tabela 8: Valores da umidade ótima.

	Franca-SP		Aparecida de Goiânia-GO		Ponta Grossa-PR	
	SN	SN+3,0%	SN	SN+2,2%	SN	SN+3,0%
■ Umidade ótima	12,5	12,6	18,8	19,3	27,5	26,7

Fonte: Alvim, Meira e Felix (2020).

Trzaskos e Orłowski (2020) utilizaram três amostras de solo em que cada uma possuía uma predominância de faixa granulométrica (arenoso, siltoso e argiloso) e utilizaram 2% e 3% de aditivo para os ensaios geotécnicos tradicionais, obtendo resultados do CBR e expansão, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados de CBR e Expansão.

TIPO DE SOLO	SEM DYNABASE		2% DYNABASE		3% DYNABASE	
	CBR (%)	EXPANSÃO (%)	CBR (%)	EXPANSÃO (%)	CBR (%)	EXPANSÃO (%)
SOLO ARGILOSO	13,82	1,02	22,6	0,82	29,18	0,78
SOLO SILTOSO	5,3	1,3	20,27	0,42	25,2	0,35
SOLO ARENOSO	22,6	0,11	71,3	0,02	89,55	0,01

Fonte: Trzaskos e Orłowski (2020)

Para todos os tipos de solos estudados, percebe-se um aumento da resistência e a redução da expansão ao aumentar o teor de aditivo. Tal efeito provém do fato que o Dynabase atua como um agente cimentante que proporciona uma agregação das partículas do solo natural ao reagir com o aditivo químico, reduzindo a expansão, aumentando a resistência do solo, semelhante ao que ocorre com o uso do cimento Portland e a cal.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar o programa experimental realizado para avaliar a eficiência do produto comercial em amostras de solos passante na peneira nº10 (2 mm) conforme orientações das normas de classificação MCT. As amostras são compostas por solo puro e por misturas de solo com a utilização de dosagens do produto comercial em avaliação.

2.1 Materiais

As amostras de solo foram coletadas em uma jazida denominada J60, localizada no estado de Sergipe, no município de Siriri, distante cerca de 50 km da capital Aracaju. A escolha desse material para estudo surgiu da disponibilidade do mesmo no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GeoPav), advindo da realização da investigação das características geotécnicas pela EdificarSE – Empresa Júnior de Arquitetura e Engenharia da Universidade Federal de Sergipe.

Através da análise tátil-visual, as amostras foram classificadas como uma argila arenosa com presença de pedregulhos, com coloração vermelho-claro, a Figura 17 demonstra o solo puro.

Figura 17: Solo puro



Fonte: Autor (2023)

O estabilizante químico utilizado foi o produto comercial intitulado Dynabase, demonstrado na Figura 18. A Tabela 10 mostra a composição química do Dynabase, dessa maneira é possível observar a alta concentração do elemento Cálcio, corroborando com o divulgado pela fabricante, em que o estabilizante comercial Dynabase possui em sua composição hidróxido de cálcio e tem a função de complementar beneficemente a granulometria do solo.

Tabela 10: Composição química do dynabase.

Parâmetros	Unidades	L.M.	L.Q.	L.D.	Resultados
Antimônio	mg Sb/Kg	-	2,2	0,7	n.d.
Arsênio	mg As/Kg	-	0,11	0,03	n.d.
Bário	mg Ba/Kg	-	2,1	0,7	13
Berílio	mg Be/Kg	-	0,40	0,13	n.d.
Cádmio	mg Cd/Kg	-	0,4	0,1	n.d.
Chumbo	mg Pb/Kg	-	2,5	0,8	n.d.
Cobalto	mg Co/Kg	-	0,27	0,08	1,08
Cálcio	mg Ca/Kg	-	8,3	2,6	464000
Cobre	mg Cu/Kg	-	1,1	0,4	1,0
Cromo VI.	mg Cr/Kg	-	13,5	4,5	n.d.
Cromo	mg Cr/Kg	-	1,71	0,5	0,6
Mercurio	mg Hg/Kg	-	0,038	0,012	n.d.
Molibdênio	mg Mo/Kg	-	0,5	0,2	n.d.
Níquel	mg Ni/Kg	-	1,0	0,3	7,8
Prata	mg Ag/Kg	-	3,0	0,9	n.d.
Selênio	mg Se/Kg	-	0,23	0,07	n.d.
Tálio	mg Tl/Kg	-	0	0	n.d.
Vanádio	mg V/Kg	-	0,5	0,1	18,8
Zinco	mg Zn/Kg	-	1,0	0,3	3,5
Umidade	%	-	0,3	0,1	33
Óleos/Graxas	%	-	0,3	0,1	0,7
Cianeto	mg CN/Kg	250	5,1	1,7	5,6
Fluoreto	mg F/Kg	-	120	40,0	1014
Fenóis Totais	mg C ₆ H ₅ OH/Kg	-	3	1	n.d.
PH	-	<2,0 e 12,5	-	-	12,26
Cor	UH	-	6	2,0000	cinza
Odor	-	-	-	-	ausente

Obs.:

- 1 – L.M.: Limites Máximos da NBR 10004:2004.
- 2 – L.D.: Limites de Detecção do Método.
- 3 – n.d. : Não Detectado

Fonte: Dynabase (2023)

Esse produto foi escolhido devido aos bons resultados divulgados pela fabricante em seu catálogo, como a redução do índice de plasticidade (IP) e expansão e o aumento do ISC, além daqueles demonstrados através de estudos realizados para solos das regiões Sul-Sudeste do Brasil. Ainda, essa escolha foi fortemente influenciada pela pouca ou mesmo ausência de estudos nos solos da região Nordeste, especificamente no estado de Sergipe.

Figura 18: Dynabase - estabilizante de Solos.



Fonte: Autor (2023)

Os teores de Dynabase escolhidos, inicialmente foram baseados nos estudos referenciados na literatura, em que foram utilizados 2,2% do estabilizante químico, em relação a massa total seca. Nesta pesquisa, foram utilizados os teores de 3% e 5% do estabilizante químico em relação à massa seca do solo puro.

2.2. Métodos

As amostras de solos que foram coletadas na jazida foram trazidas em sacos de nylon, de capacidade 50 kg, aproximadamente. A separação e a preparação das amostras para a realização dos ensaios foram realizadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016).

O programa experimental para o estudo em questão teve início com a realização da preparação das amostras para a realização dos ensaios de mini compactação e mini-CBR do solo puro, segundo as normas DNER-ME 228/94 e 254/97, respectivamente, e a determinação do mini-MCV e perda de massa por imersão (Pi), segundo a norma DNER-ME 258/94.

As amostras de solos preparadas para cada ensaio, são:

- 5 amostras de 500 gramas de material passante na nº10 (2 mm) para ensaio de mini compactação e mini-CBR.
- 5 amostras de 500 gramas de material passante na nº 10 (2 mm) para ensaio de mini-MCV e perda de massa por imersão.

Com as amostras preparadas, deu-se início a colocação da umidade em cada porção, levando em consideração os resultados da compactação obtidas pelo estudo de Cavalcante (2022) utilizando o método tradicional. Em seguida, cada amostra foi armazenada em sacos plásticos e armazenados na câmara úmida, com o objetivo de impedir a perda de umidade de acordo com a DNER-ME 258/94. Com os dados do solo puro por meio da metodologia MCT, foi possível a classificação dos mesmos, e assim, realizar as misturas com os teores de Dynabase previamente definidos.

2.2.1. Ensaios de caracterização física

Para a caracterização física do solo com a incorporação do aditivo, foram realizados os ensaios de análise granulométrica conjunta, massa específica dos grãos, limite de liquidez e limite de plasticidade do ponto considerado ótimo, ou seja, que possui massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, de acordo com os ensaios de mini compactação e mini-CBR.

2.2.1.1. Análise granulométrica conjunta

Tal ensaio é indicado pela NBR 7181 (ABNT, 2016). Por meio dele, é possível a obtenção das faixas granulométricas do material (pedregulho, areia, silte e argila), através dos ensaios de sedimentação, com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio, e o processo de peneiramento.

O ensaio é dividido em duas etapas: por peneiramento, ao qual é possível conhecer a porcentagem de pedregulho e areia, e sedimentação, sendo possível obter as porcentagens de silte e argila.

Como a análise granulométrica foi realizada para observar as alterações provocadas pelo Dynabase, a amostra correspondente ao ponto três da mini compactação e mini-CBR foi tomada como representante da granulometria. Assim, a amostra de 500 g foi tomada como massa de solo para o ensaio, passado na peneira nº 10 (2 mm). Da porção retida nesta peneira, foi realizado o peneiramento correspondente ao pedregulho. Da porção passante, após os ensaios de metodologia MCT anteriormente citados, foi tomado cerca de 70 g para a etapa da sedimentação, representada na Figura 19, sendo obtidas as frações correspondentes ao silte e argila.

Figura 19: Ensaio de análise granulometria por sedimentação.



Fonte: Autor (2023)

2.2.1.2. Massa específica real

A razão entre a massa das partículas sólidas e o volume que a mesma ocupa expressa a massa específica real dos grãos. O método empregado para a sua determinação foi o método do picnômetro, normatizado pela NBR 6458 (ABNT, 2016) e demonstrado na Figura 20.

O ensaio é realizado através de pesagens envolvendo as massas do picnômetro vazio (P1), picnômetro e cerca de 15 g de solo (P2), picnômetro, solo e água destilada (P3) e picnômetro e água destilada (P4). Para a retirada do ar da amostra, é realizado a sucção através de bomba a vácuo por 15 minutos. Este procedimento equivale a etapa de pesagem do P4.

Por meio de correlações entre as pesagens determina-se a densidade real dos grãos.

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)}$$

Figura 20: Execução do ensaio de massa específica real.



Fonte: Autor (2023)

2.2.1.3. Limites de Atterberg

Com o objetivo de medir a eficiência do produto comercial em relação aos limites de liquidez e plasticidade, a amostra de material preparado para esse ensaio foi derivada do ponto mais próximo da massa específica seca máxima e umidade ótima dos ensaios de mini compactação e mini-CBR.

2.2.1.3.1. Limite de liquidez

O limite de liquidez representa a umidade de transição entre os estados plástico e líquido. A umidade é dada através da obtenção em uma reta ajustável a 25 golpes ao se obter pontos entre o intervalo compreendido de 15 e 35 golpes, conforme a DNER 122/94. Para a execução deste ensaio foi necessário 120 g de solo passante na peneira nº40 (0,42 mm).

Com o auxílio do aparelho de Casagrande é colocado uma porção de solo homogeneizado com água destilada em uma altura de 1 cm. Tal medida é obtida através da altura do cinzel que se reparte a amostra no aparelho em duas porções para se dá início ao ensaio, como demonstrado na Figura 21.

Figura 21: Execução do limite de liquidez.



Fonte: Autor (2023)

2.2.1.3.2. Limite de Plasticidade

Para medir a umidade entre o estado semissólido e o plástico, é realizado o ensaio denominado limite de plasticidade. Através da adição de água destilada em uma amostra de 50 g de solo passante na peneira nº40 (0,42 mm) e, conseqüentemente, homogeneizado. Realiza-se uma pressão manual em uma placa de vidro, como demonstrado na Figura 22, com o objetivo de moldar uma massa de solo cilíndrica de diâmetro uniforme de cerca de 3 mm. Ao se desagregar, coleta-se porções desta amostra para obtenção da umidade que representa o limite de plasticidade, segundo a DNER 082/94.

Figura 22: Execução do ensaio do limite de plasticidade.



Fonte: Autor (2023)

2.2.2. Ensaio de classificação MCT

As amostras de solos utilizados no estudo, coletados na Jazida J60, apresentavam características que de acordo com Villibor (1995) são típicas de solos lateríticos. A coloração avermelhada ou de cor de tijolo, como o próprio autor cita, atrelado a pouca quantidade de material retido na peneira nº10 (2 mm) interessou ao estudo a realização dos ensaios de classificação MCT.

2.2.2.1 Mini compactação

Para a execução do ensaio representada na Figura 23, inicialmente são obtidas cinco amostras de solo passante na peneira nº10 (2 mm), cada amostra com 500 g. Após a adição de água em cada ponto e sua homogeneização, as amostras foram armazenadas na câmara úmida por 24 horas, visando manter a umidade adicionada, conforme descrito na DNER 228/94.

A quantidade de solo a ser usada no ensaio depende do tipo de solo. O soquete, diferentemente do método tradicional, apresenta seção plena, demonstrado na Figura 23, ou seja, o mesmo diâmetro do molde e a energia aplicada foi a intermediária (6 golpes de cada lado) utilizando o soquete pesado.

Para que se certifique se a quantidade de solo foi a correta, após a compactação, lê-se o extensômetro e através da diferença entre a leitura de aferição e a obtida, avalia se a diferença estiver na faixa de 50 ± 1 mm a compactação do ponto está correta. Caso contrário, deve-se realizar uma nova amostragem calculada (massa corrigida).

$$Massa\ Corrigida\ (g) = \frac{Massa\ Inicial\ (g) * 50}{A_{final\ do\ CP}}$$

Onde: $A_{final\ do\ CP}$ – Altura final do corpo de prova após a mini compactação;

Ao se realizar novamente a compactação e determinar a leitura, caso a diferença entre aferição e leitura esteja dentro do intervalo considerado, pesa-se o molde com o corpo de prova para iniciar o mini-CBR.

Figura 23: Execução do ensaio de mini compactação.



Fonte: Autor (2023)

2.2.2.2. Mini-MCV

Para o ensaio, a amostra é preparada através da passagem do solo seco ao ar na peneira nº 10 (2 mm). Separam-se cinco porções de 500 g de solo, e adiciona-se água em cada ponto, semelhante ao ensaio de mini compactação.

Após isso, realiza-se a leitura de aferição do equipamento, com o objetivo de referenciar a amostra compactada e o cilindro-padrão (50 mm). Para a compactação, toma-se a porção com maior umidade (H1) e pesam-se 200g da mesma, introduzindo-a no molde da compactação. Adapta-se o soquete sobre a amostra e dá-se o primeiro golpe ($n=1$).

Determina-se a altura A_1 do corpo-de-prova, utilizando-se o extensômetro, repetem-se as operações de medida da altura após os golpes sucessivos seguintes: 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, n , $4n$. (NOGAMI E VILLIBOR, 1995).

Repete-se as operações para as demais umidades. Das alturas $4A_n-A_n$ dos corpos de prova em compactação, traça-se a família de curvas *versus* umidade, possibilitando a obtenção dos coeficientes angulares das retas. A interseção dessas retas com a_n igual a 2,00 mm, fornece o Mini-MCV.

2.2.2.3. Perda de Massa por Imersão

A perda de massa por imersão é um parâmetro fundamental para a classificação MCT. O mesmo é dado, após o ensaio de mini-MCV, onde o solo dentro do molde é deslocado 1 cm para fora do bordo do cilindro e imerso no tanque com água, conforme demonstrado na Figura 24.

A quantidade de material que cai nas cubas, após 20 horas de ensaio no mínimo, é determinada ao atingir a constância de massa seca. Ao se obter as umidades de cada ponto, atrelado com o tipo de desprendimento do bloco de 1 cm, define o coeficiente denominado perda de massa por imersão (P_i).

Figura 24: Execução do ensaio perda de massa por imersão.



Fonte: Autor (2023)

2.2.2.4. Mini-CBR e Expansão

O ensaio provém da execução do ensaio de mini compactação. O molde pesado é colocado numa base de placa perfurada, coloca-se um papel-filtro na base do molde com o objetivo de se evitar que haja perda de material ao ser colocado o molde no tanque de submersão com água. Além do papel-filtro, são colocadas a sobrecarga e o relógio comparador (extensômetro) com o objetivo de medir a expansão do solo ao ser submergido.

A leitura inicial do extensômetro é colocado em 1,00 mm, visando contemplar também casos de contração, ou seja, que se obtenham resultados menores que o inicial, no qual o solo ao invés de expandir, se contrai.

Para o estudo em questão, visando adequar ao procedimento tradicional do ensaio de CBR, foi utilizado o mini-CBR com embebição, onde o corpo de prova permaneceu imerso em água durante 96 horas, semelhante ao método tradicional e demonstrado na Figura 25. Sendo assim, foi possível analisar o comportamento do estabilizante químico com o solo na presença de água por mais tempo do que prescreve a DNER-ME 254/97, que se indica na mesma um período de 20 horas.

O cálculo da expansão é dado pela seguinte equação:

$$E = \frac{(L_f - L_i)}{A_i} * 100$$

Onde: E – expansão; L_f - leitura final; L_i – leitura inicial; A_i – altura inicial do CP;

Figura 25: Determinação da expansão.



Fonte: Autor (2023)

Após o período de submersão, retiram-se os cilindros do tanque e deixam secar por 60 minutos, após isso, inicia-se o preparo para o rompimento na prensa manual de mini-CBR.

Para o rompimento, levanta-se o prato da prensa até que a ponta do pistão encoste no topo do corpo de prova, que se percebe através da presença de carga, medida no extensômetro, demonstrado na Figura 26.

Inicia o rompimento, através da sincronia entre os tempos padronizados de ensaio e as penetrações dos deslocamentos do pistão (0,25 mm, 0,50 mm, 0,75 mm, 1,00 mm, 1,25 mm, 1,50 mm, 2,0 mm, 2,5 mm, 3,0 mm, 3,5 mm, 4,0 mm, 4,5 mm e 5,0 mm).

Figura 26: Execução do ensaio mini-CBR.



Fonte: Autor (2023)

O cálculo do mini-CBR é dado pelas leituras das cargas (C_1 e C_2) dos deslocamentos referentes a 2,00 mm e 2,50 mm, através das seguintes fórmulas:

$$\log (\text{Mini} - \text{CBR}. 1) = -0,254 + 0,896 * \log C. 1.$$

$$\log (\text{Mini} - \text{CBR}. 2) = -0,254 + 0,896 * \log C. 2.$$

O maior valor obtido corresponde ao valor de mini-CBR.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização física

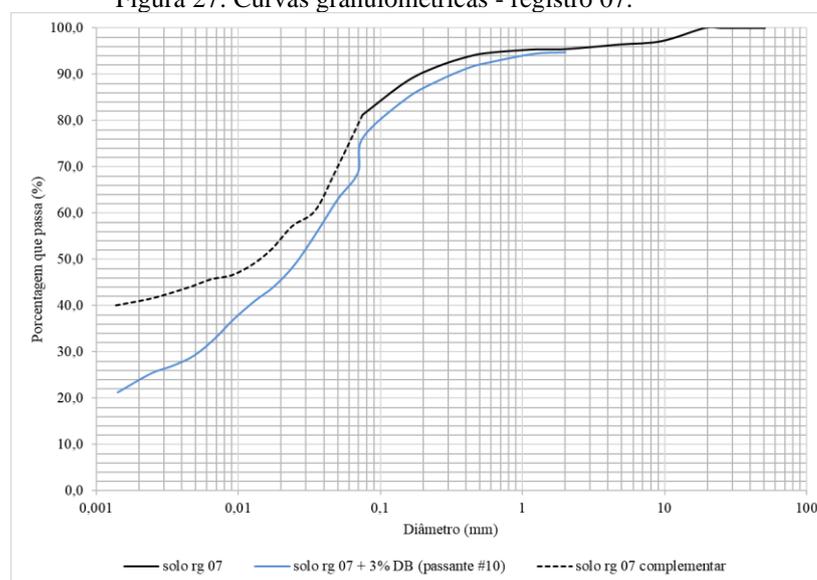
Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios que envolveram a análise granulométrica conjunta e limites de Atterberg.

a) Análise granulométrica conjunta

A Figura 27 apresenta as curvas granulométricas referentes ao registro 07 (rg 07), solo puro e com a adição de 3% do Dynabase. A análise granulométrica do registro 07 foi realizada por Cavalcante (2022), porém, somente considerando o peneiramento. Dados complementares a esta análise foram obtidos para a caracterização da curva até a etapa da sedimentação. Sua representação consta na curva granulométrica abaixo com o trecho de linha tracejada.

Quanto a curva granulométrica do registro 07 mais 3% do aditivo, a sua representação gráfica parte do diâmetro 2 mm (# n°10), uma vez que este ensaio foi realizado após os ensaios da metodologia MCT (mini compactação e mini-CBR) os quais necessitam de material passante na peneira 10.

Figura 27: Curvas granulométricas - registro 07.



Fonte: Autor (2023)

A curva granulométrica referente ao solo puro apresenta uma porcentagem de finos maior do que a amostra de solo com o aditivo. Tal fato é perceptível pelas menores porcentagens de material passante nas faixas granulométricas, em que o solo puro possui 79% de material passante na peneira n° 200 (0,075 mm) enquanto que o rg 07 + 3% de aditivo possui 75%, aproximadamente. Isso mostra que o aditivo, após quatro dias de cura imerso em

água para o ensaio de mini-CBR, altera a granulometria do solo, atribuindo-lhe uma maior porcentagem de material com maior diâmetro em relação ao solo sem aditivo.

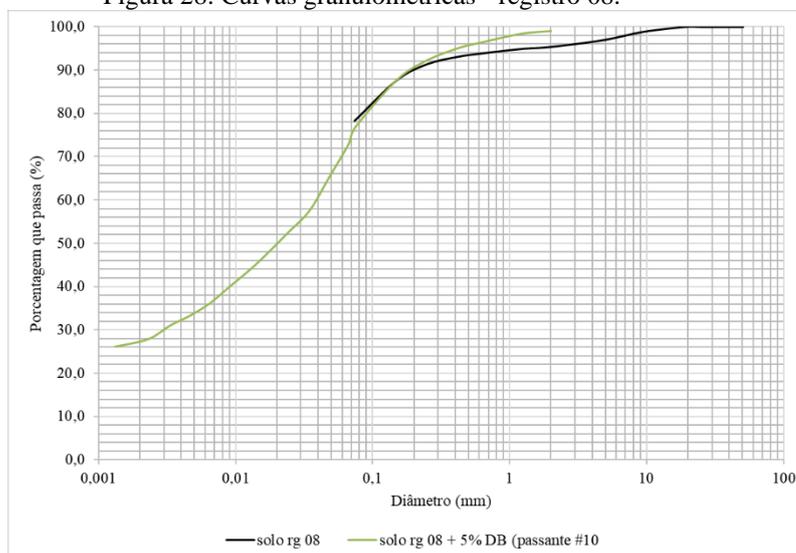
A Figura 28 apresenta as curvas granulométricas referentes ao registro 08 (rg 08), solo puro e com adição de 5% do Dynabase. Para o solo puro, o ensaio foi realizado apenas por peneiramento, não sendo possível realizar a etapa da sedimentação em virtude da falta de material disponível para a execução do ensaio, conforme realizado no registro 07.

Porém, pode-se prever que, de acordo com a trajetória da curva traçada, há uma tendência de continuidade semelhante ao obtido através do ensaio por sedimentação do registro 07.

Contudo, há uma grande probabilidade dessa continuidade ser representada por uma maior porcentagem de material passante, uma vez justificada pela maior plasticidade do solo rg 08 conforme será apresentado adiante.

Segundo as explicações acima, pode-se inferir que a adição do aditivo promove uma diminuição da porcentagem que passa nas faixas granulométricas abaixo da peneira nº10 (2 mm). Tal fato provém do efeito aglutinante das partículas que o Dynabase promove no beneficiamento granulométrico por meio da redução da fração fina do solo.

Figura 28: Curvas granulométricas - registro 08.



Fonte: Autor (2023)

As alterações provocadas pela adição do aditivo condizem com as informações divulgadas pela fabricante (DYNABASE, 2023) que auxilia na uniformidade da curva granulométrica, através da redução da quantidade de finos e, conseqüentemente, a redução da plasticidade.

Tal efeito de beneficiamento granulométrico também foi constatado nos estudos de Gomide (2015) ao qual foi utilizado o aditivo Dynabase com o objetivo de enquadrar uma

mistura solo-RCD (Resíduo da Construção e Demolição) em uma das faixas granulométricas. A incorporação do aditivo promoveu o aumento de finos, fazendo com que a amostra estabilizada granulometricamente possa se encaixar na faixa C da norma ES 141/2022, que permite o uso em camadas de base de pavimentos.

b) Limites de Atterberg

Ao analisar os resultados dos ensaios de Limites de Atterberg (Tabela 11), percebe-se uma redução no índice de plasticidade do solo puro ao ser incorporado o estabilizante químico. Notou-se que houve uma redução do valor de limite de liquidez (LL) para os dois teores analisados, e um aumento no valor do Limite de Plasticidade (LP) para o teor de 3%, e uma diminuição para o teor de 5%, fazendo com que o solo com aditivo tivesse um menor valor de Índice de Plasticidade (IP).

Tabela 11: Resumo dos valores do ensaio de limites de Atterberg.

AMOSTRA	LL	LP	IP
Rg 07	40	25	15
Rg 07 + 3% DB	38	26	12
Rg 08	44	25	19
Rg 08 + 5% DB	38	23	15

Fonte: Autor (2023)

Tais valores corroboram com o analisado nas curvas granulométricas, entre os intervalos das peneiras n°40 (0,42 mm) e n°200 (0,075 mm), pois houve um aumento da fração areia média e fina ao ser adicionado os teores do aditivo. Além disso, foi possível perceber que houve uma redução da fração fina do solo ao ser adicionado o aditivo ao solo puro, isto é, material passante na peneira n°200 (0,075 mm).

Assim, o Dynabase atua como agente modificador das partículas, uma vez que reduziu a plasticidade, tal comportamento se assemelha ao realizado na estabilização química utilizando a cal e cimento Portland e os resultados corroboram com os estudos de Junior (2016).

Para o estudo apresentado no presente trabalho de conclusão de curso, os teores aqui utilizados de Dynabase não foram possíveis atender aos requisitos de plasticidade mínimos que possibilitassem o uso em camadas de base, no qual é necessária possuir limite de liquidez igual ou menor que 25% e, conseqüentemente, índice de plasticidade igual ou menor que 6%, segundo as recomendações técnicas DNIT 142/2022 que trata sobre base melhorada com cimento.

3.2 Classificação MCT

Ao analisar os resultados do ensaio Mini-MCV e Pi presentes na Tabela 12, obtém-se parâmetros que definem o comportamento das amostras de solos analisadas, segundo a metodologia MCT, ou seja, se possuem comportamento laterítico ou não-laterítico.

Tabela 12: Parâmetros dos registros 07 e 08.

Rg 07	$c' = 2,24$	$d' = 35,7$	Pi = 130	$e' = 1,23$
Rg 08	$c' = 2,18$	$d' = 38,2$	Pi = 120	$e' = 1,20$

Fonte: Autor (2023)

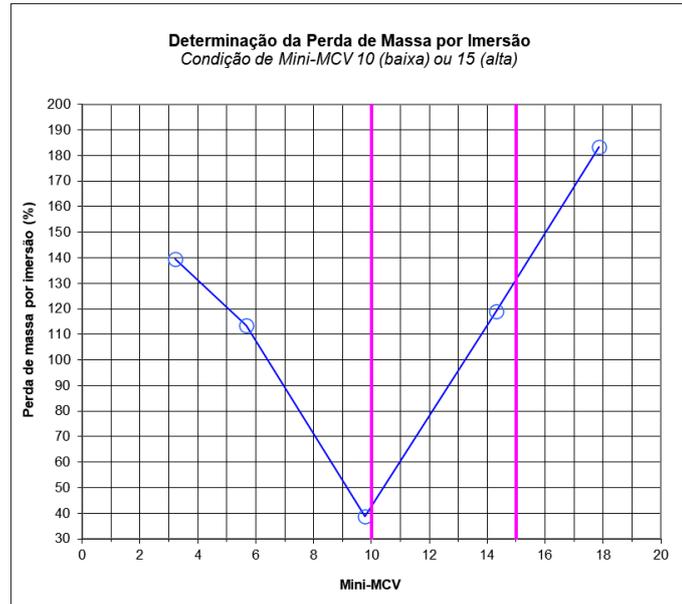
Segundo Nogami e Villibor (1995), o parâmetro c' correlaciona-se com a granulometria do solo e há valores limites para cada tipo de solo. Dessa maneira, valores acima de 1,5 representam argilas, entre 1,0 e 1,5, areias siltosas e argilas arenosas e menor que 1,0, representam as areias e siltes não plásticos. Ao analisar os valores obtidos nos ensaios para esse parâmetro, tal valor se encaixa na classe das argilas e corrobora o antes analisado pela classificação tátil visual com o previsto pela literatura.

O parâmetro d' apresenta uma correlação com os parâmetros da compactação, que são a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima. Além disso, há valores definidos para cada tipo de solo, em que areias finas argilosas possuem valores acima de 100, argilas lateríticas acima de 20 e argilas não-lateríticas valores inferiores a 10. Os resultados obtidos para os solos ensaiados mostraram valores acima de 20, encaixando na classe de argilas lateríticas.

O parâmetro Pi é obtido quando se correlaciona as porcentagens do material que sobressai com os valores do Mini-MCV, onde a altura final do corpo de prova determina se o solo possui alta ou baixa massa específica aparente. Através da relação entre o valor de Pi e o do Mini-MCV, é possível obter se o solo estudado possui comportamento laterítico ou não. Segundo Nogami e Villibor (1995), em solos lateríticos, os resultados de perda de massa por imersão apresentam um decréscimo nítido no valor, se aproximando de zero, em intervalos correspondentes a Mini-MCV igual a 10 ou 15, a depender do tipo de massa específica aparente.

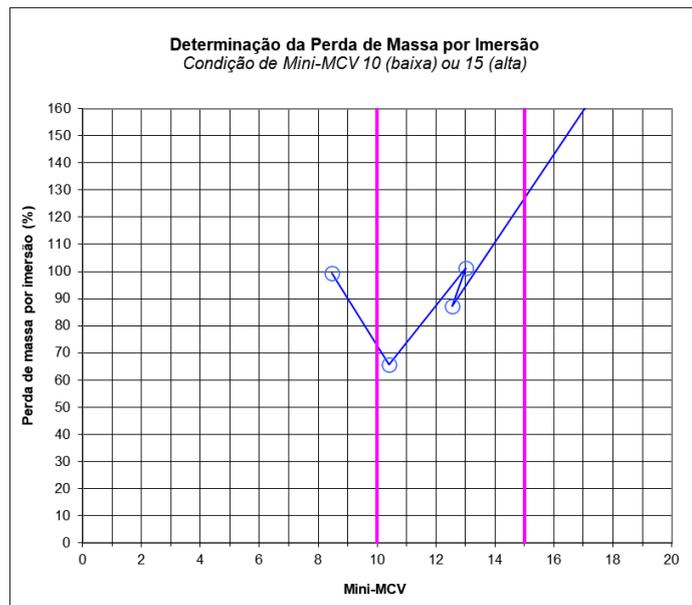
Para as duas amostras de solos demonstrados nas Figuras 29 e 30, percebe-se uma indefinição quanto ao Pi, uma vez que ora apresentou densidade alta ora densidade baixa (mini-MCV 10 e mini-MCV 15, respectivamente). Assim, o solo rg 07 e o solo rg 08 não se encaixam em nenhuma classe dos solos lateríticos. Por esta razão, os solos em estudo, são classificados como não-lateríticos e representados pelos Figura 31 e 32.

Figura 29: Determinação do Pi - registro 07



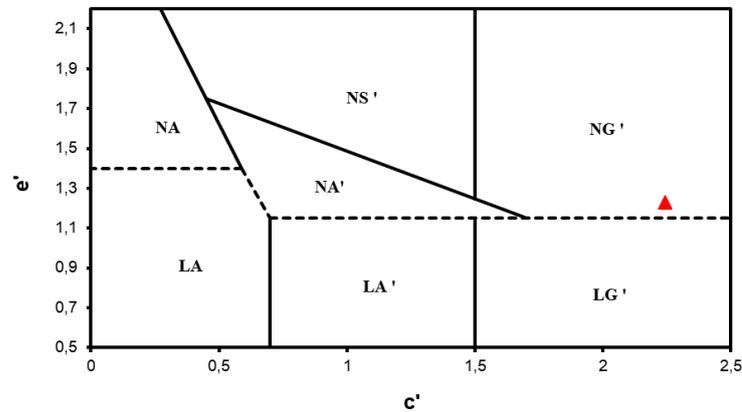
Fonte: Autor (2023)

Figura 30: Determinação do Pi - registro 08



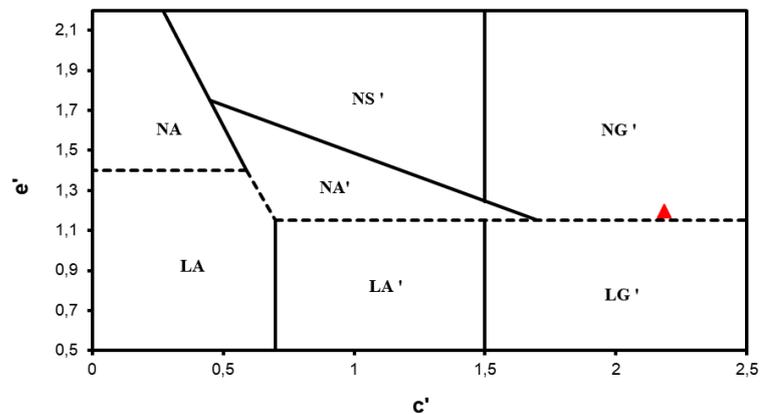
Fonte: Autor (2023)

Figura 31: Classificação MCT - registro 07



Fonte: Autor (2023)

Figura 32: Classificação MCT - registro 08



Fonte: Autor (2023)

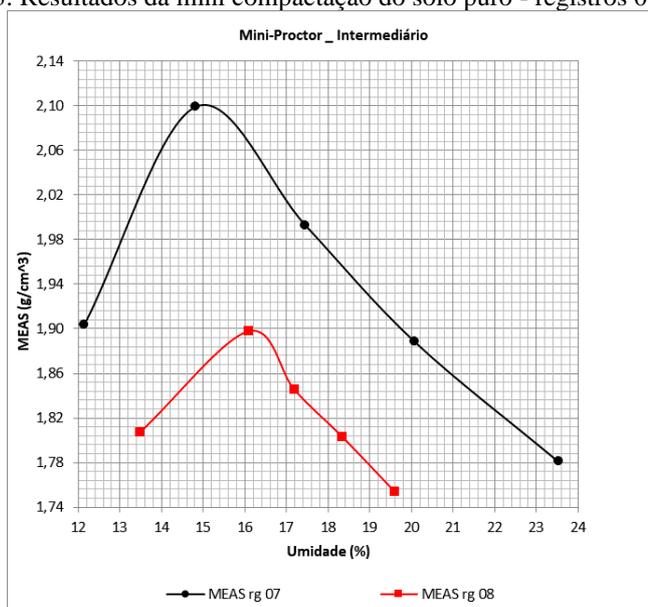
3.3.Caracterização Mecânica

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios da mini compactação e mini-CBR do solo puro e das amostras com adição de aditivo.

a) Solo Puro – Rg 07 e Rg 08

A Figura 33 mostra as curvas de compactação obtidas após a realização do ensaio mini compactação. Ao analisar os resultados para as duas amostras de solo puro, percebe-se que o registro 07 possui massa específica aparente seca máxima (MEAS) igual a 2,10 g/cm³ e umidade ótima igual a 15,0% enquanto que o registro 08 apresenta massa específica aparente seca máxima igual 1,90 g/cm³ e umidade ótima igual a 16,1%.

Figura 33: Resultados da mini compactação do solo puro - registros 07 e 08.



Fonte: Autor (2023)

Tais resultados demonstram que o solo puro do registro 07 tende a possuir maior quantidade de material granular. Apesar da análise granulométrica não mostrar o material passante na peneira nº200 (0,075 mm), deduz-se que o solo do registro 08 apresenta maior quantidade de partículas finas em comparação ao solo puro do registro 07, uma vez que apresentou uma maior umidade ótima.

A Figura 34 mostra a relação entre a MEAS, umidade e índice de vazios para as duas amostras de solo estudadas, sendo a Figura 34 (a) relacionada ao registro 07 e Figura 34 (b), registro 08. Ao analisar os gráficos, percebe-se a relação inversamente proporcional entre o MEAS e o índice de vazios, em que o ponto de maior MEAS apresenta o menor índice de vazios.

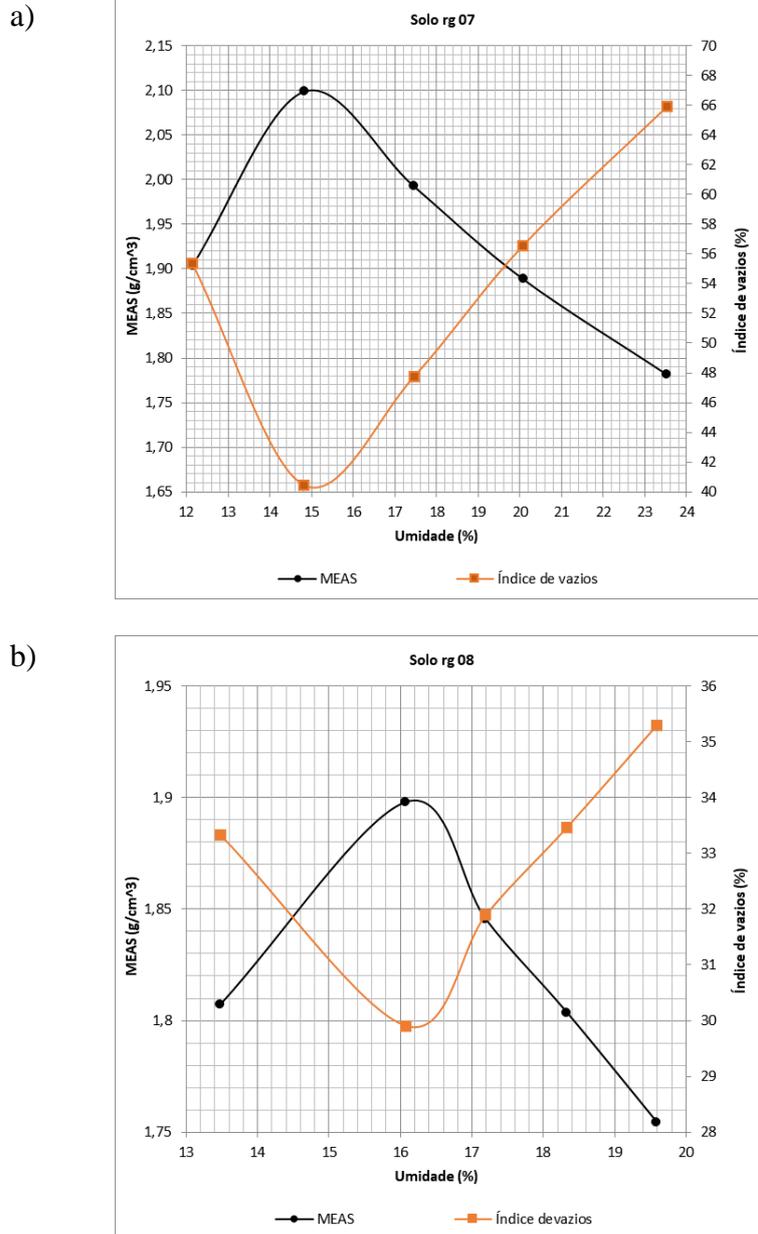
Como dito anteriormente, as amostras de solos estudadas (rg 07 e 08) foram ensaiadas por meio do método tradicional por Cavalcante (2022). Para o rg 07 foi obtido massa específica aparente seca máxima no valor de 1,863 g/cm³ e umidade ótima de 16,4%, já o rg 08 foi obtido massa específica aparente seca máxima de 1,860 g/cm³ e umidade ótima de 16,9%.

Ao comparar os resultados obtidos dos parâmetros da compactação, através do método tradicional e da metodologia MCT para as duas amostras de solo puro, percebe-se que o registro 07 possui um aumento de massa específica seca máxima de 0,237 g/cm³ e uma redução de 1,4% na umidade ótima, ao ser utilizado o ensaio de mini compactação.

Para o rg 08, houve um aumento do valor da massa específica aparente seca máxima na ordem de 0,04 g/cm³ e uma redução de 0,8% nos valores da umidade ótima ao serem

utilizados os ensaios de mini compactação e comparando ao método tradicional de compactação.

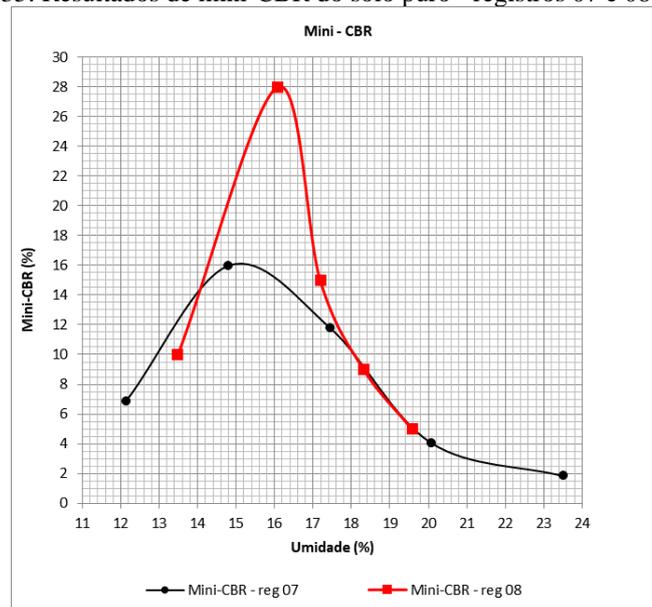
Figura 34: Relação entre MEAS, índice de vazios e umidade.



Fonte: Autor (2023)

Para o ensaio de mini-CBR, ao analisar os resultados presentes na Figura 35, é possível perceber que o rg 07 possui mini-CBR igual a 16% e o rg 08 possui mini-CBR igual a 28%. Para o método tradicional realizado por Cavalcante (2022), os resultados de CBR do rg 07 e 08 foram ambos iguais a 13%.

Figura 35: Resultados de mini-CBR do solo puro - registros 07 e 08.



Fonte: Autor (2023)

O maior valor de CBR obtidos através da metodologia MCT das amostras de solo puro (rg 07 e 08) em comparação ao método tradicional pode ser explicado através da amostragem de material que é utilizado em cada ensaio, principalmente na execução da preparação deste material.

No método tradicional, é utilizado o material além do passante na peneira nº 10 (2 mm), também o material retido nesta peneira. Já na metodologia MCT, o material utilizado para ensaio é somente o passante na peneira nº10 (2 mm), ou seja, um material mais homogêneo ao se comparar com o utilizado no método tradicional.

b) Solo + (%) aditivo

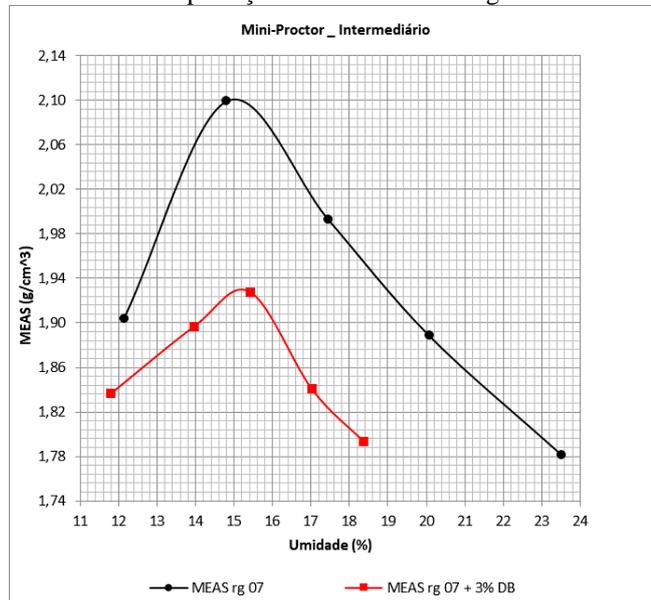
A Figura 36 mostra as curvas de compactação obtidas após a realização do ensaio mini compactação para o solo do registro 07 aditivado com o 3% de Dynabase. Percebe-se que o aditivo proporcionou uma redução nos valores da massa específica aparente seca máxima e praticamente não houve alteração na umidade ótima.

Na amostra de solo puro, tem-se que a massa específica aparente seca máxima é igual a $2,10 \text{ g/cm}^3$, enquanto que a amostra com 3% de aditivo possui massa específica aparente seca máxima de $1,93 \text{ g/cm}^3$. Para os valores da umidade ótima, a diferença é de apenas de 0,2%, sendo para o solo puro 15,00% e para a amostra com 3% de aditivo 15,20%.

Para o solo registro 08 aditivado com 5% de Dynabase, a Figura 37 apresenta as curvas de compactação. Ao analisar, observa-se que houve a redução da massa específica aparente seca máxima e a mesma umidade ótima. O solo puro possui massa específica aparente seca

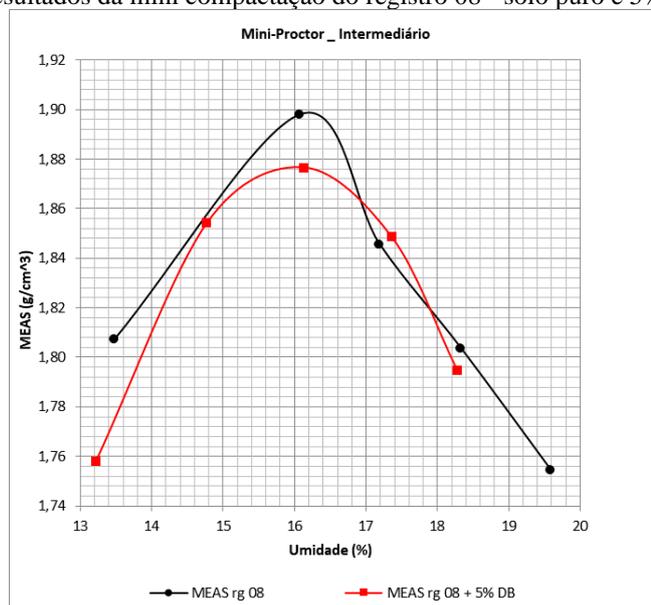
máxima de $1,90 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima $16,1\%$, enquanto a mistura aditivada possui massa específica aparente seca máxima igual a $1,88 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima $16,1\%$.

Figura 36: Resultados da mini compactação das amostras do registro 07 - solo puro e 3% DB.



Fonte: Autor (2023)

Figura 37: Resultados da mini compactação do registro 08 - solo puro e 5% DB.

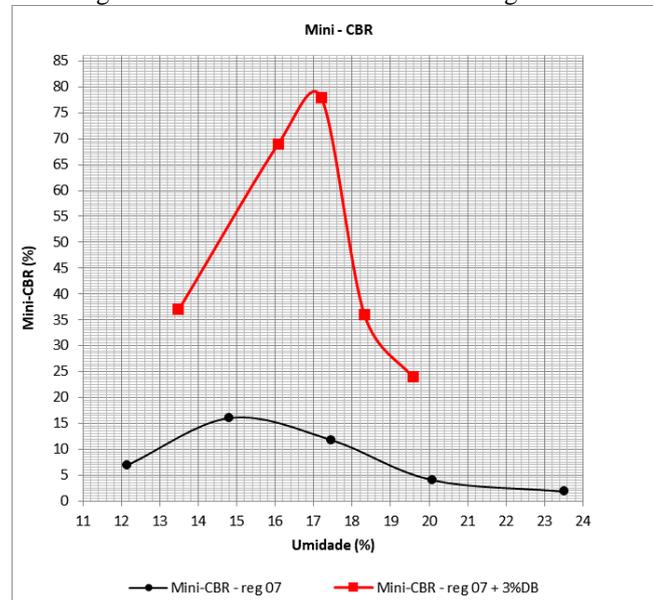


Fonte: Autor (2023)

Em posse dos parâmetros obtidos dos ensaios de mini compactação, pode-se deduzir que o aditivo ao ser incorporado ao solo puro, promove uma redução do MEAS, no entanto, permanecem os valores da umidade ótima, tal comportamento também pode ser visto nos estudos de Junior (2016) e no de Alvim, Meira e Felix (2020).

A Figura 38 apresenta os resultados do mini-CBR do registro 07, do solo puro e da mistura de solo + 3% Dynabase.

Figura 38: Resultados do mini-CBR - registro 07.

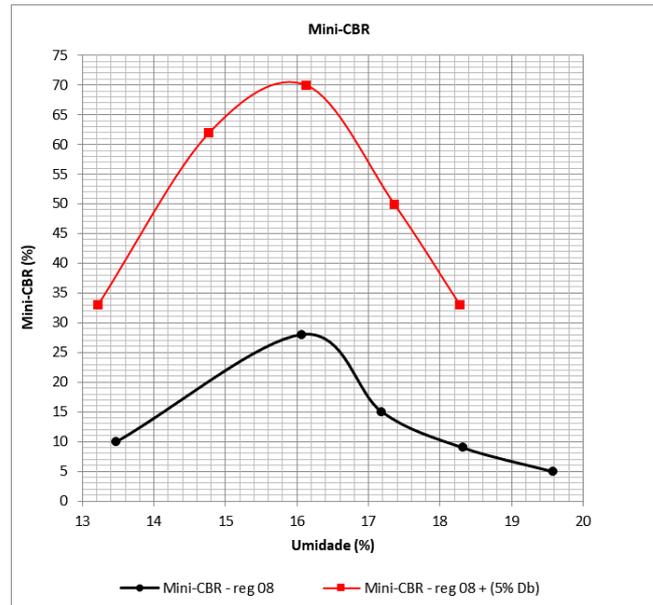


Fonte: Autor (2023)

Observa-se um aumento da resistência entre os resultados. O solo puro possui mini-CBR igual a 16%, já o solo aditivado com 3% de Dynabase foi obtido um valor de 78%. Tais valores representam um aumento de cerca de 500% com o incremento do aditivo ao solo puro. De acordo com os dados obtidos, esse solo estabilizado quimicamente se aproxima do valor especificado para o CBR tradicional na camada de base de pavimento, de acordo com a especificação DNIT 142/2022 (quando para alto volume de tráfego). Porém, como material de camada de sub-base, o mesmo pode ser utilizado segundo a especificação DNIT 140/2022.

A Figura 39 mostra o resultado de mini-CBR para o solo registro 08 puro e aditivado com 5% de Dynabase. Nota-se que houve um aumento da resistência em que o solo puro possui mini-CBR igual a 28%, enquanto que o solo com 5% de aditivo possui mini-CBR igual a 71%. A amostra rg 08, ao ser adicionado 5% do aditivo, recebe um incremento de resistência mecânica, em cerca de 250% em comparação aos valores correspondentes ao do solo puro. A mesma utilização como camada de pavimento demonstrada para a mistura anterior se aplica para a esta mistura.

Figura 39: Resultados do mini-CBR - registro 08.



Fonte: Autor (2023)

O aumento da resistência do solo através do uso do estabilizante químico analisado, provém do fato que o mesmo possui características aglutinantes que, através das reações químicas, beneficia positivamente na resistência. Tal fato também está presente em outros estudos, como o de Trzaskos e Orłowski (2020), por exemplo, ao qual retratam o mesmo comportamento benéfico quando se refere à resistência mecânica do solo natural ao se incorporar o estabilizante químico Dynabase.

A Tabela 13 apresenta um resumo dos ensaios de caracterização. Pode-se observar que a adição do Dynabase promoveu a redução da plasticidade, MEAS e expansão, a umidade ótima não é alterada e os valores de mini-CBR apresentam um aumento significativamente ao comparar com os resultados das amostras do solo puro.

Tabela 13: Resumos dos ensaios de caracterização.

AMOSTRA	Rg 07	Rg 08	Rg 07 + 3%DB	Rg 08 + 5%DB
LL	40	44	38	38
IP	15	19	12	15
MEAS (g/cm³)	2,10	1,90	1,93	1,88
Wótima (%)	15,0	16,1	15,2	16,1
Mini-CBR (%)	16	28	78	71
Expansão (%)	1,40	0,67	0,06	0,42

Fonte: Autor (2023)

Ao analisar os resultados da expansão, percebe-se para as duas amostras de solo puro, o rg 07 possui uma expansão maior que o rg 08, porém ao ser incorporado o Dynabase, nota-se uma redução maior ao ser utilizado 3% do Dynabase do que o teor de 5% do Dynabase.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dos resultados obtidos através dos ensaios realizados, foi possível classificar o solo estudado segundo a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) e definir o comportamento do mesmo. Além disso, foi possível comparar as propriedades físicas e mecânicas das amostras de solo puro dos registros 07 e 08 e com a adição dos teores de 3% e 5%, respectivamente. Dessa forma, as seguintes conclusões puderam ser obtidas:

- 1) As amostras de solo puro foram classificadas como não-lateríticas, por não atenderem ao comportamento da relação entre mini-MCV e a perda de Massa por Imersão, apresentando altos valores de mini-MCV 10 e 15, distanciando do comportamento laterítico;
- 2) A adição do aditivo Dynabase promoveu o beneficiamento granulométrico das amostras de solo puro, principalmente por aglutinar as partículas finas, reduzindo a porcentagem que passa nas peneiras inferiores a usadas para os ensaios MCT;
- 3) A redução dos valores dos índices de plasticidade ao ser incorporado o aditivo advém da ação modificadora do mesmo, tal comportamento também está presente na estabilização química com o uso do cimento Portland e Cal;
- 4) Nos ensaios de mini compactação, o uso do Dynabase promoveu uma redução dos valores da massa específica seca máxima e uma constância nos valores de umidade ótima;
- 5) Nos ensaios de mini-CBR, os resultados com a adição do aditivo Dynabase promoveu um aumento significativo na resistência do solo puro, atingindo valores que, comparados ao CBR tradicional, possibilita o uso em camadas de sub-base estabilizadas quimicamente e se aproximando de valores que permitem a utilização em camadas de base estabilizadas quimicamente para alto volume de tráfego.

Portanto, os ensaios apresentados mostram preliminarmente que o aditivo Dynabase proporcionou uma alteração na granulometria do solo e na plasticidade, além de aumentar a resistência à penetração do pistão com os altos valores de mini-CBR.

Como pesquisa futura, sugere-se realizar ensaios com uma maior variedade de solos, com diferentes porcentagens de teores do aditivo, executar os ensaios de resistência a compressão simples com o objetivo de estudar o comportamento do aditivo ao longo do tempo. Ainda, se possível, realizar um estudo experimental em campo e de viabilidade econômica ao se comparar com o uso dos recursos naturais e o aditivo Dynabase.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVIM, G, Meira, Y.C.S.S. e Felix, E.F. **Análise do potencial de uso do produto Dynabase em estradas e pavimentos**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto-SP, 2020. 11p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457: Amostra de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro. 2016. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6458: Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro. 2016. 14p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181: Solo – análise granulométrica**. Rio de Janeiro. 2016. 12p.
- ASSUNÇÃO, J. **Análise de resistência do estabilizante químico dynabase na pavimentação em função do tempo de cura: um estudo de caso**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Adventista de São Paulo, São Paulo, SP. 65p.
- AZEVEDO, A.L.C. **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. 2010. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 178p.
- BALBO, J.T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARROSO, S. H. A. e FABRI, G. T. P., 1996, “**Algumas Considerações sobre a Classificação MCT e seus Índices**”, In: Anais da 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Salvador/BA.
- BERNUCCI, L.L.B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. 1995. 237p. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- BERNUCCI, L.L.B (et. al). **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2ª edição, 2022.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 3.ed. - Rio de Janeiro, 2006. 274p.
- CAVALCANTE, E.H. **Relatório final n. 002/2022. Ensaios de caracterização geotécnica, ensaios de compactação, ensaios de índice de suporte Califórnia e ensaios de compressão triaxial**. 2022. 23p.
- COSTA, J.H. **Caracterização geotécnica dos solos finos, da faixa litorânea e tabuleiros costeiros do Estado de Sergipe, visando a aplicação em pavimentos de baixo volume de tráfego**. 2006. 318p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER 082/94: Solos – determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1994. 3p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER 122/94: Solos – determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1994. 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER 228/94: Solos - compactação em equipamento miniatura.** Rio de Janeiro, 1994. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER 259/96: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura.** Rio de Janeiro, 1996. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER 254/97: Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-CBR e expansão.** Rio de Janeiro, 1997. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - **DNIT 139/2010: Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010, 8p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - **DNIT 141/2010: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010, 9p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - **DNIT 140/2022: Pavimentação – Sub-base de solo melhorado com cimento - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2022, 12p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - **DNIT 142/2022: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2022, 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - **DNIT 143/2022: Pavimentação – Base de solo -cimento - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2022, 13p.

Disponível em: <https://www.dicio.com.br/estabilizar/>. Acesso em 22, mar, 2023.

Disponível em: <https://dynabase.com.br>. Acesso em 22, mar, 2023.

Disponível em: <https://www.suportesolos.com.br/blog/analise-granulometrica-do-solo-ensaios-geotecnicos-a-curva-e-os-tipos-de-analise/72/>. Acesso em: 22, mar, 2023.

FERREIRA, A. M. **Estudo de três solos estabilizados com uma emulsão asfáltica catiônica.** Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1980. 99p.

FRANÇA, F. C. **Estabilização Química de Solos para fins rodoviários: Estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”.** 2003. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2003. 104 p.

GISANDRA, F.D. P. et al. **Classificação MCT-M: Estudo de Caso para um Solo Tropical do Distrito Federal.** In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/classificacao-mct-m-estudo-de-caso-para-um-solo-tropical-do-distrito-federal?lang=pt-br>> Acesso em: 22 mar. 2023.

GODOY, H. e BERNUCCI, L. B., 2000, “**Localização de Jazidas de Solos para Construção de Rodovias com Auxílio de Mapas Pedológicos e de Método Exedito de Ensaio**”, In. Anais do Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico, Universidade Mackenzie, São Paulo/SP.

GONDIM, L. M., **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará.** Dissertação de Mestrado, Programa de

Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2008, 213 p.

GOMIDE, L.M.A. **Estabilização do solo para base de pavimentos utilizando mistura de solo, aditivo químico e resíduo da construção e demolição (RCD)**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 72p.

LOVATO, R.S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 164p.

JÚNIOR, C.M.A. **Estudo da influência da utilização de estabilizante a base de hidróxido de cálcio aditivado em amostras de solos para fins de pavimentação**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, AC. 62p.

MALANCONI, M. **Considerações sobre misturas de solos tropicais estabilizados quimicamente para uso como camada de pavimento urbano**. 2013. 94p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, SP.

MITCHELL, J.K. and SITAR, N. (1982). “**Engineering Properties of Tropical Residual Soils**”. Geotechnical Speciality Conf. on Eng. And Const. in Tropical and Residual Soils. Honolulu, Hawaii. pp 30-57. ASCE.

NOGAMI, Job Shuji e VILLIBOR, D F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor. 1995. Acesso em: 22 mar. 2023.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. 291 f. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

ROCHA, M.T. e REZENDE, L.R. **Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação**. 2017. 25p. Artigo Científico. Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental. Goiânia, GO.

SANTOS, W. J. **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe**. 2009. 165p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, PB.

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

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 2001. 671p.

SHERWOOD, P. **Soils stabilization with cement and lime. State of the Art Review**. London: Transport Research Laboratory, HMSO, 1993.

SOUZA, L. A. M. **Análise dos limites de Atterberg em intervalos granulométricos de um solo laterítico puro e aditivado com cimento Portland**. 2022. 61p. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.

TRZASKOS, L. W. e Orłowski, M.F. **Incorporação de aditivo químico para o melhoramento do solo na pavimentação**. 2020. Artigo Científico. UNIFACEAR. Bahia. 11p.

VILLIBOR, D. F.; ALVES, D. M. L., **Pavimentação de baixo custo para regiões tropicais: projeto e construção: novas considerações**. Editora Tribo da Ilha, 1 ed., 546 f, 2019.

WOLLENSCHLAGER. M.M. Análise comparativa de estruturas de pavimentos flexíveis implantadas em subleitos submetidos à estabilização química e mecânica - estudo de caso. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Superior de Criciúma, Criciúma, SC. 132p.