



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Ricardo Henrique Kinast

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE SEIXO ROLADO PROVENIENTE DO
DESASSOREAMENTO DO RIO PARDINHO EM PAVIMENTOS**

Santa Cruz do Sul

2023

Ricardo Henrique Kinast

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE SEIXO ROLADO PROVENIENTE DO
DESASSOREAMENTO DO RIO PARDINHO EM PAVIMENTOS**

Trabalho de conclusão apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
de Santa Cruz do Sul para obtenção do
título de Engenheiro Civil.

Orientador: Dr. Leandro Olivio Nervis.

Santa Cruz do Sul

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me proporcionado chegar até aqui. Aos meus pais, Valdo Kinast (*in memoriam*) e Nersi Kinast que sempre me ajudaram no que estava ao seu alcance. Ao amigo Kako que me incentivou, levou a fazer a inscrição do vestibular e a matrícula no curso. Ao meu amigo Flávio que me ajudou incansavelmente por todo período da graduação, sempre me motivando e auxiliando na escrita de trabalhos. Ao Engenheiro Everton Ferreira que me deu a brilhante ideia do tema deste trabalho de conclusão. Aos professores, mas principalmente ao meu professor e orientador Leandro Olivio Nervis, o qual me ajudou muito, me orientando diariamente, na parte escrita, na parte de interpretação e até mesmo em todos os ensaios deste trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

O presente estudo objetivou analisar a possibilidade de utilizar seixos em bases e sub-bases de pavimentos. Foram colhidos materiais provenientes do rio Pardinho em Santa Cruz do Sul (RS), os quais estavam armazenados na Secretaria de Obras e Infraestrutura da Prefeitura do mesmo município. Os seixos, misturados ali com resíduos finos, foram submetidos a diversos ensaios de padronização universal e regional, junto ao Laboratório da Universidade de Santa Cruz do Sul (RS), no sentido de verificar a relação custo-benefício de um material encontrado na natureza em abundância, talvez em todas as regiões do país. Através de diversos e precisos ensaios, foi possível concluir que o seixo rolado de desassoreamentos dos rios pode ser uma alternativa promissora, material de baixo custo e boa resistência para o uso em bases e sub-bases de pavimentos, uma vez respeitados certas contingências.

Palavras-chave: Seixo Rolado; Desassoreamento; Base; Sub-base.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplificação dos esforços solicitantes no pavimento.....	13
Figura 2 - Comportamento mecânico esperado do pavimento flexível.....	15
Figura 3 - Comportamento mecânico esperado do pavimento rígido.....	15
Figura 4 - Estruturação das camadas de pavimento.....	16
Figura 5 - Brita Graduada Simples.....	20
Figura 6 - Bica Corrida.....	20
Figura 7 - Macadame Hidráulico.....	21
Figura 8 - Macadame Seco.....	21
Figura 9 - Paralelepípedo.....	21
Figura 10 - Solo Arenoso Fino Laterítico.....	22
Figura 11 - Solo Brita.....	22
Figura 12 - Solo Saprolítico.....	22
Figura 13 - Solo Laterítico Concrecionado.....	23
Figura 14 - Classificação de solos MCT.....	38
Figura 15 - Tipos granulométricos G-MCT.....	39
Figura 16 - Seixos.....	41
Figura 17 - a, b, c - Desassoreamento de rios.....	42
Figura 18 - Localização e drenagem da bacia do rio Pardinho.....	43
Figura 19 - Localização da extração do material do rio pardinho.....	44
Figura 20 - Extração do material na Secretaria de Obras de Santa Cruz do Sul.....	45
Figura 21 - Quarteamento do material.....	46
Figura 22 - Conjunto de peneiras acopladas em ordem decrescente.....	48
Figura 23 - Solo com a ranhura no aparelho de Casagrande.....	50
Figura 24 - Solo em formato esférico.....	51
Figura 25 - Compactação do solo no cilindro.....	57
Figura 26 - Corpos de prova submersos no tanque de água.....	59
Figura 27 - Corpo de Prova sendo rompido na prensa CBR.....	59
Figura 28 - Corpo de Prova no aparelho Mini-MCV.....	64
Figura 29 - Corpos de Prova submersos no tanque.....	65
Figura 30 - Curva Granulométrica.....	67
Figura 31 - Curva de Compactação.....	69

Figura 32 - Curva de ISC	70
Figura 33 - Gráfico da Classificação MCT	72
Figura 34 - Classificação granulométrica G-MCT	72
Figura 35 - Gráfico das Faixas Granulométricas para sub-base	74
Figura 36 - Gráfico das Faixas Granulométricas para base	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades e utilização dos grupos de solo da classificação MCT.....	24
Tabela 2 - Especificações das classes 1,2 e 3 para o uso na sub-base	25
Tabela 3 - Valores de ISC e EA para o uso na sub-base.....	25
Tabela 4 - Faixas Granulométricas da Classe A	26
Tabela 5 - Faixas Granulométricas da Classe B	26
Tabela 6 - Faixas Granulométricas da Classe C	27
Tabela 7 - Propriedades e hierarquização de uso dos grupos de solos da classe GL.	28
Tabela 8 - Propriedades e hierarquização de uso dos grupos de solos da classe GN.	29
Tabela 9 - Critérios do Solo Laterítico Agregado Contínuo para base e sub-base....	30
Tabela 10 - Critérios do Solo Laterítico Agregado Descontínuo para base e sub-base.	31
Tabela 11 - Classificação G-MCT.	40
Tabela 12 - Quantidade de material.	47
Tabela 13 - Faixas Granulométricas.	53
Tabela 14 - Carga Abrasiva.....	53
Tabela 15 - Elementos para o ensaio e sanidade.	54
Tabela 16 - Parâmetros para o ensaio de compactação	56
Tabela 17 - Características geotécnicas do solo estudado.	68
Tabela 18 - Compactação.	69
Tabela 19 - ISC e Expansão	71
Tabela 20 - Resultados e exigências para o uso na sub-base.....	74
Tabela 21 - Resultados e exigências para o uso na base.....	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos.....	10
1.2 Justificativa.....	10
1.3 Delimitação do tema.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Os Pavimentos	12
2.1.1 Aspectos Históricos	12
2.1.2 Aspectos gerais sobre pavimentos.....	13
2.2 Classificação dos pavimentos	14
2.3 Camadas dos pavimentos asfálticos	15
2.3.1 Revestimento	16
2.3.2 Base e Sub-base	17
2.3.3 Reforço de Subleito	17
2.3.4 Subleito	18
2.4 Materiais empregados em camadas inferiores dos pavimentos asfálticos	18
2.5 Especificações dos materiais empregados nas camadas inferiores de pavimentação asfáltica	23
2.5.1 Reforço do subleito	23
2.5.2 Sub-Base e Base	25
2.6 Ensaio tradicionais para caracterização de materiais utilizados em camadas inferiores de pavimentos asfálticos	32
2.6.1 Granulometria por peneiramento.....	32
2.6.2 Limites de Atterberg	33
2.6.3 Sanidade	33
2.6.4 Abrasão Los Angeles	34
2.6.7 Compactação	34
2.6.5 Índice de Suporte Califórnia – ISC ou CBR (<i>California Bearing Ratio</i>)	35
2.6.6 Equivalente de areia.....	36
2.7 Classificações MCT e G-MCT	36
2.7.1 Solos Tropicais.....	36

2.7.2 Classificação MCT	37
2.7.3 Classificação G-MCT.....	38
2.8 Seixos e Desassoreamento de rios.....	40
3 METODOLOGIA.....	43
3.1 Descrição Geral do Material de Estudo.....	43
3.2 Coleta de amostras e preparação de amostras.....	44
3.3 Ensaio de laboratório.....	46
3.3.1 Análise Granulométrica	47
3.3.2 Limite de liquidez.....	49
3.3.3 Limite de plasticidade e índice de plasticidade de solos	50
3.3.4 Equivalente de areia.....	51
3.3.5 Determinação da abrasão Los Angeles de agregados.....	52
3.3.6 Determinação da sanidade de agregados pelo uso de sulfato de sódio	54
3.3.7 Compactação e CBR.....	55
3.3.7.1 Ensaio de compactação	55
3.3.7.2 Ensaio de CBR.....	58
3.3.8 Ensaio de compactação Mini-MCV e de perda de massa por imersão	60
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	67
4.1 Ensaio de Laboratório	67
4.1.1 Ensaio de Caracterização.....	67
4.1.2 Ensaio de Compactação e ISC.....	69
4.1.3 Classificação G-MCT.....	71
4.1.4 Abrasão e Durabilidade dos agregados	73
4.1.5 Equivalente de Areia	73
4.2 Aptidão do material estudado para o emprego em base e sub-base de pavimentos.....	73
4.2.1 Emprego do material em camadas de sub base de pavimentos	73
4.2.2 Emprego do material em camadas de base de pavimentos.....	75
5 CONCLUSÃO.....	77
REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

Com o agravo da revolução agrícola e o progresso das grandes civilizações históricas, fundamentou-se a necessidade de haver construção de vias de transporte de cargas e pessoal, como fator essencial ao progresso da nação. Em vista disto, no que concerne à sociedade contemporânea, observa-se igual necessidade de deslocamento sistêmico de mercadorias, porém com maior agilidade. Devido à valorização da produtividade e eficiência, a qualidade do local por onde escoar o tráfego define o sucesso ou não das atividades (BALBO, 2007). Como consequência, observa-se, com referência à tecnologia construtiva de rodovias no período moderno, a presença de um item que impacta sumamente a qualidade das vias de tráfego: o pavimento.

Em se tratando do contexto específico do Brasil da atualidade, no que se refere à malha modal de transportes, observa-se uma preferência às rodovias. Esse modal se constitui no principal meio nacional empregado para o transporte de cargas e movimentação de pessoas, com representatividade percentual de 60% e 90%, respectivamente, segundo a Confederação Nacional do Transporte – CNT (CNT, 2018).

A pesquisa CNT Rodovias analisa Pavimento, Sinalização e Geometria. Em 2022, 66% das rodovias apresentaram problemas no estado geral, classificadas como Regular, Ruim ou Péssimo, contra 34% classificadas como Ótimo ou Bom. Especificamente no quesito Pavimento - que mais importa aqui - foram observados 55,5% de conceito Regular, Ruim ou Péssimo, contra 44,5% de Ótimo ou Bom (CNT 2022). Embora a sinalização e a geometria estejam ainda piores do que as falhas de pavimento, é aos problemas de superfície que estão associados o uso de material subdimensionado ou mal escolhido e a mais aguda negligência na manutenção, fatores estes que levam a uma degradação profunda que, por sua vez, requer intervenções complexas e mais onerosas (CNT 2022).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), em 2019 eram necessários investimentos de R\$ 38,6 bilhões para restauração das rodovias brasileiras. A União destinou R\$ 7,5 bilhões em 2018 e R\$ 6,8 bilhões em 2019. Aproximadamente 60% das estradas apresentam estado geral regular, ruim ou péssimo, principalmente no que se refere à geometria das vias (CNT, 2019). A falta de investimentos em infraestrutura e conservação afeta em demasia a competitividade do país, eis que acarreta acidentes,

gargalos, atrasos e perdas de carga. Os reparos e remendos deslocam recursos que seriam preciosos para a adequação ou duplicação das rodovias. Os investimentos da União (CNT, 2019) na malha rodoviária vem apresentando, a cada ano, sensível decréscimo. Diante de um cenário de aflitiva escassez de verbas, torna-se imperativo voltar as atenções para componentes de menor preço e com a mesma eficácia, de modo a contemplar mais rodovias com os exíguos recursos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é realizar uma avaliação do emprego de seixo rolado proveniente do desassoreamento do rio Pardinho em pavimentos, à luz de especificações das normas nacionais e da literatura especializada.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são os seguintes:

1. Verificar se o material de estudo, seixo rolado do Rio Pardinho qualifica-se para uso de acordo com as especificações tradicionais;
2. Averiguar em qual grupo de classificação G-MCT o material está incluso;
3. Analisar a possibilidade de concepção estrutural de pavimentos de baixo custo com o emprego do material em estudo.

1.2 Justificativa

A demanda por estradas cresce rapidamente com a intensidade do tráfego pesado e sem que os poderes públicos consigam atender em qualidade e quantidade às demandas de pavimentações. Diante da exiguidade de recursos para distribuir em muitas frentes, surge a busca por suprir mais caminhos com menos custos e mesma eficácia.

Na natureza, existem agregados de baixo custo de forma abundante, como, por exemplo, os seixos dos rios. Eles figuram em profusão nas diversas regiões do país.

Sua extração é relativamente simples, operada por empresas mineradoras sob vigilância e mapeamento dos órgãos ambientais, inclusive via satélite. As jazidas de areia e seixos são facilmente detectáveis e manipuláveis de modo a não agredir o equilíbrio do meio ambiente. Sua coleta, uma vez regrada e controlada, promove o desassoreamento dos rios, navegáveis ou não, ao mesmo tempo que regula a deposição de refugos e previne a queda de barrancos.

Nos rios dos vales do Rio Pardo e do Jacuí são frequentes as extrações de minérios por empresas autorizadas, as quais extraem areia e desprezam seixos. Como os agregados impactam sobremaneira o custo-benefício nas diversas camadas do pavimento, cabe medir as propriedades, valores e características dos seixos rolados disponíveis a curta distância, para avaliar seu desempenho perante sua exposição a alguns ensaios consagrados.

A motivação do autor para realizar o trabalho surgiu a partir do exercício de estágio junto à Secretaria de Obras e Infraestrutura de Santa Cruz do Sul (RS), onde existe expressiva demanda por pavimentações de ruas e estradas vicinais. Como ali há grande interesse por soluções de baixo custo, o autor do trabalho pretende, também, prestar uma contribuição para o Município, no sentido de apontar se o material é ou não promissor para o emprego em camadas de pavimentação nas vias municipais.

1.3 Delimitação do tema

O presente trabalho tenciona estudar o emprego de seixos rolados do Rio Pardinho em pavimentos, especialmente para a base e sub-base, seguindo os princípios básicos da geotecnia e pavimentação. O tema se delimita em coleta de amostras a serem submetidas a ensaios em laboratório, para avaliar se o material é adequado ao uso proposto, conforme os cânones da mecânica dos solos e das normas técnicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Os Pavimentos

2.1.1 Aspectos Históricos

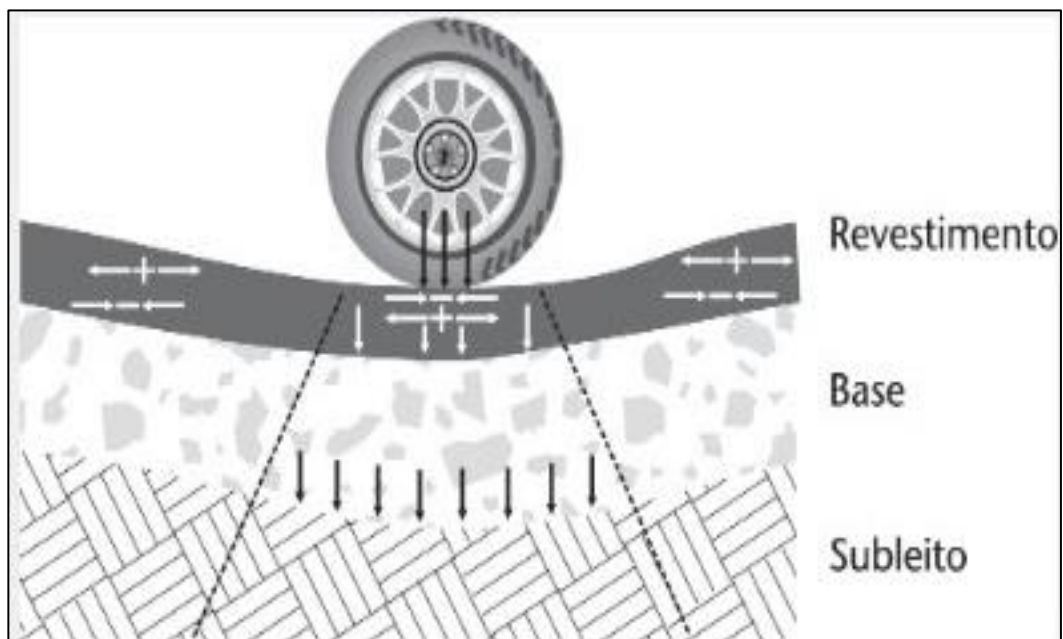
Com a descoberta da roda, há cerca de 7 mil anos, algumas cidades passaram a ter 10 mil habitantes. As cargas mais pesadas comercializadas mostraram a vulnerabilidade dos caminhos, sobretudo em épocas de chuva (BERNUCCI *et al.* 2022). A primeira estrada pavimentada com pedras é datada de 4 mil anos a.C na Índia e na Mesopotâmia (ABRAMS 2013). Também na Mesopotâmia (atual Iraque), tem-se, segundo Bernucci *et al.* (2022), a Estrada de Semíramis, entre a Babilônia e Ecbátana no Império Persa. Entre esses antigos caminhos, ainda conforme os autores, destaca-se a Estrada da Seda, enorme rota de comércio que ia da China à Europa. Mais tarde o Império Romano traçaria em solo europeu memoráveis vias, algumas pavimentadas. A mais extensa das vias europeias (Hagen, 1955 *apud* Bernucci *et al.*, 2022) cobria 5 mil km da Escócia até Jerusalém. Na América Latina, merecem destaque as estradas construídas pelos incas no Peru. O alemão Alexander von Humboldt, viajando em 1799, qualificou as estradas incas como "os mais úteis e estupendos trabalhos realizados pelo homem" (BERNUCCI *et al.* 2022). Conforme os autores, uma das primeiras estradas no Brasil teve início em 1560, por obra do governador geral Mem de Sá, ligando São Vicente ao planalto Piratininga, hoje São Paulo.

Em 1937, Getúlio Vargas cria o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. Em 1942, o Brasil começa a utilizar o ensaio americano conhecido como *California Bearing Ratio* – CBR. Neste ano, o Brasil possuía apenas 1.300 km pavimentados, uma das menores extensões da América Latina. Para ilustrar o atraso do país, em 2020 o consumo de asfalto por ano foi de 2,3 milhões de toneladas, contra 26 milhões nos Estados Unidos (BERNUCCI *et al.*, 2022).

2.1.2 Aspectos gerais sobre pavimentos

Segundo Balbo (2007), compreende-se como pavimento uma estrutura colocada superiormente a camadas distintas que se sobrepõem, no intuito de prover alívio às tensões resultantes de carregamentos diversos, a fim de garantir a durabilidade estrutural dos componentes que integram este conjunto, por meio da prevenção de falhas, rupturas, trincas, deformações, e outras ocorrências de caracterização negativa. Dessa forma, destaca-se que cada estrutura do pavimento se destina a uma conjunção de funcionalidades específicas, para fins de adequação quanto aos fatores de projeto, de acordo com os parâmetros do comportamento das propriedades mecânicas referentes a cada componente que integra o sistema em questão. Com base nisso, observa-se na Figura 1 a exemplificação dos esforços atuantes no pavimento e camadas subjacentes.

Figura 1 - Exemplificação dos esforços solicitantes no pavimento



Fonte: Balbo, 2007.

Observa-se na Figura 1 que na camada mais externa da estrutura considerada há a presença de solicitações de orientação vertical e horizontal. As primeiras resultam em compressão e cisalhamento dos componentes. Já as de orientação

horizontal transmitem às outras partes da estrutura esforços como tração e confinamento por consequência do carregamento especificado (BALBO, 2007).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), os pavimentos são projetados de modo que cada camada tenha certa espessura e rigidez e que o sistema de camadas responda com a adequada rigidez conjunta. Em pavimentos asfálticos, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância. Limitar as tensões e deformações na estrutura por meio de combinação de materiais e espessuras de camadas é o objetivo da mecânica dos pavimentos (MEDINA e MOTTA, 2015 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2022)

2.2 Classificação dos pavimentos

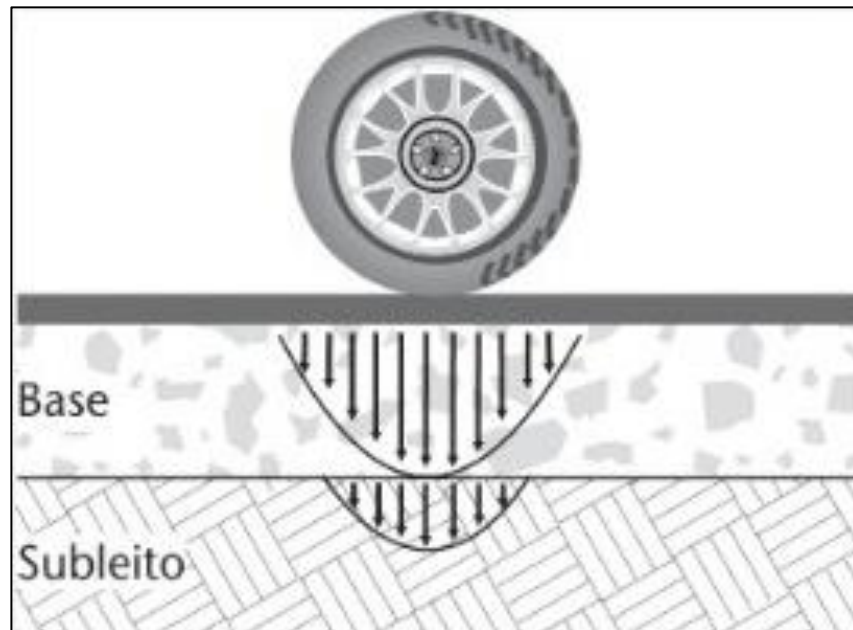
Conforme Bernucci *et al.* (2022), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas destinada a resistir aos esforços e pressões causadas pelo tráfego e pelo clima. Tradicionalmente, o pavimento viário classifica-se em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Mais recentemente, a nomenclatura que vem sendo mais empregada é a de pavimentos de concreto-cimento e pavimentos asfálticos.

O pavimento de concreto apresenta revestimento em placas de cimento Portland, cujas espessura e rigidez dependem da resistência oferecida pelas camadas subjacentes. Quanto mais rígidas forem a base e a sub-base, menos espessa poderá ser a placa de concreto (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Os pavimentos asfálticos englobam os pavimentos flexíveis cujas camadas inferiores ao revestimento são constituídas por solos, materiais granulares e agregados diversos. Já os pavimentos semirrígidos usam, abaixo do revestimento asfáltico, bases feitas de materiais cimentados ou aglutinados por ligante hidráulico. Desta forma, o "semirrígido" - classificação contestada por alguns autores - promove uma harmonia entre a rigidez da base/sub-base e a flexibilidade do revestimento asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2022).

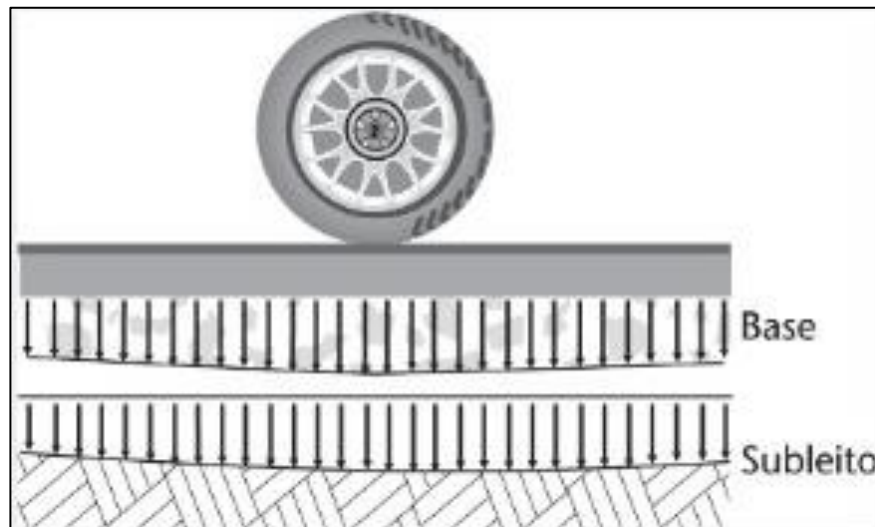
Segundo Balbo (2007), os comportamentos mecânicos esperado dos pavimentos rígidos e flexíveis apresentam significativa diferença entre si, principalmente no que tange à distribuição das tensões resultantes. No pavimento denominado flexível ocorre maior concentração de tensão, enquanto no rígido há relevante distribuição superficial, conforme destaca-se nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 - Comportamento mecânico esperado do pavimento flexível.



Fonte: Balbo, 2007.

Figura 3 - Comportamento mecânico esperado do pavimento rígido



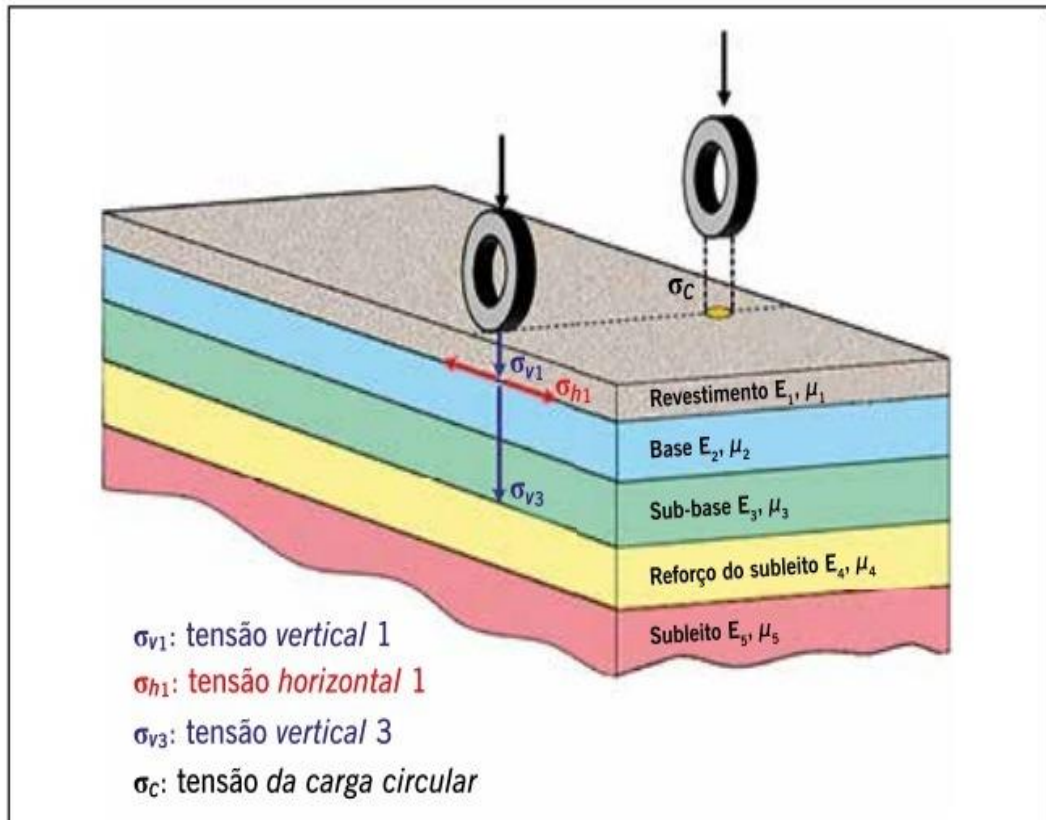
Fonte: Balbo, 2007.

2.3 Camadas dos pavimentos asfálticos

Segundo Bernucci *et al.* (2022), os pavimentos asfálticos podem ser constituídos por até cinco camadas, a saber: Revestimento, Base, Sub-Base, Reforço do Subleito

e Subleito. Na Figura 4 é apresentada uma ilustração da estrutura típica de um pavimento asfáltico, e, nos subitens seguintes, uma breve descrição de cada camada.

Figura 4 - Estruturação das camadas de pavimento.



Fonte: Bernucci et.al, 2022.

2.3.1 Revestimento

De acordo com Balbo (2007), o revestimento compreende o contato inicial entre o carregamento solicitante, seja ele de natureza estática ou dinâmica, e os esforços resultantes. Segundo Bernucci *et al.* (2022) o revestimento recebe os esforços de compressão e de tração devido à flexão, submetendo as camadas abaixo a compressão por serem de materiais granulares ou solo.

Conforme Bernucci *et.al* (2022), o revestimento asfáltico é destinado a resistir às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, sem sofrer deformações plásticas consideráveis ou mesmo elásticas, impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento. As tensões na camada asfáltica

pela ação das cargas são responsáveis pelo surgimento de danos, como o trincamento por fadiga ou por envelhecimento do ligante, por afundamentos, deformações, tensões cisalhantes ou ação climática. Desta forma, o revestimento é a camada primordial, importante fator de projeto para conferir qualidade e resistência à estrutura. O revestimento deve ser feito de materiais bem aglutinados para evitar que tenha deslocamento horizontal. Portanto, ele pode ser composto por duas ou mais camadas, de acordo com critérios econômicos e estruturais (BALBO, 2007).

2.3.2 Base e Sub-base

Conforme Balbo (2007), o alívio de pressões sobre as camadas inferiores é exercido por bases e sub-bases, as quais também auxiliam na drenagem. Quando é exigida uma camada de base muito espessa para aliviar os esforços, adota-se uma camada de sub-base, empregando-se um material de menor custo. As duas camadas podem usar brita, brita graduada, agregados e solos estabilizados natural ou quimicamente. No caso da sub-base, os estabilizantes químicos, quando aplicados, são em baixos teores por motivo de economia. Segundo Bernucci *et al.* (2022), cada vez mais vem sendo empregados agregados, fíleres, materiais pozolânicos, reciclados de origens diversas e resíduos industriais, como escórias, coprodutos de mineração, borrachas e plásticos.

2.3.3 Reforço de Subleito

Quando o subleito é feito de solo com baixa resistência, é preciso executar sobre ele um reforço de melhor qualidade, a menos que houvesse camadas superiores muito espessas (BALBO 2007). Assim, novamente por razões de economia, o reforço de subleito pode ensejar menor espessura na base e sub-base, ao mesmo tempo que protege o subleito de tensões profundas.

2.3.4 Subleito

De acordo com Balbo (2007) os esforços impostos sobre o subleito se dispersam no primeiro metro, porquanto os estratos superiores já amenizam as pressões. Assim, o subleito pode ser constituído de material natural, ou transportado, ou até mesmo aterro de características medíocres. Segundo Bernucci *et al.* (2022) o subleito em aterro deve ter a compactação controlada, atingindo um grau mínimo especificado no projeto.

2.4 Materiais empregados em camadas inferiores dos pavimentos asfálticos

Segundo Balbo (2007), quaisquer camadas que não utilizem ligantes hidráulicos são objeto de compactação mecânica, segundo a granulometria dos componentes da estrutura, que se denominam agregados. Neste sentido, de acordo com Bernucci *et al.* (2022), compreende-se por agregado os materiais de diversos tamanhos, como a areia, o pedregulho, os seixos, cascalhos e rochas específicas, que poderão ser mesclados em proporções variáveis, dependendo das exigências operacionais.

Dessa forma, segundo Balbo (2007), destacam-se como principais materiais empregados em camadas de pavimentos asfálticos: Bica Corrida (BC), Brita Graduada Simples (BGS), Macadame Hidráulico (MH), Macadame Seco (MS), Paralelepípedos (PAR), Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL), Solo-brita ou Solo Estabilizado granulométricamente (SB), Solo Saprolítico (SS), Solo Laterítico Concrecionado (SLC).

A Brita Graduada Simples (Figura 5) consiste em um material largamente utilizado na indústria da pavimentação, sendo constituído por agregados específicos, em geral retirados de um mesmo corpo rochoso, que são integrados, com umidade controlada, em uma usina adequada, para fins de obtenção de um material devidamente graduado (BALBO, 2007). Neste sentido, segundo Bernucci *et al.* (2022), a BGS apresenta resistência apropriada ao emprego em bases e sub bases, com granulometria não excedendo os 38mm e com finos entre 3 e 9%. Apresentam boa permeabilidade e podem ser empregadas em pavimentos de concreto ou asfálticos.

A bica corrida (Figura 6) não apresenta controle de qualidade granulométrico. Normalmente é mal graduada por não apresentar diversas frações granulométricas,

apresentando insuficiente resposta quanto ao processo de compactação, pois, após retirada do britador, não ocorre a cadeia processual usual de peneiramento, sendo orientada diretamente à estocagem ou aplicação. Tal material é muito utilizado em camadas de base ou sub-base do pavimento, na dimensão de 100mm a 150mm, por se tratar de um componente com menor custo de aquisição (BALBO, 2007).

O Macadame hidráulico (Figura 7) é uma tecnologia ultrapassada no Brasil, havendo sido substituída pela BGS, em meados do século XX. O MH consiste na compactação de agregados graúdos, cujo vazão entre os grãos é preenchido com miúdos, feito por varrição e compactados mecanicamente após o emprego de água para facilitação do processo (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2022). O Macadame Seco (Figura 8) é um material similar ao MH, no entanto, utiliza-se como agregado graúdo um componente conhecido por “rachão”, em conjunção com os miúdos, havendo esforço de compactação na ausência de fluidos facilitadores (BALBO, 2007).

Os paralelepípedos (Figura 9) consistem em componentes rochosos com geometria variando de 220mm a 280mm de comprimento, por 110mm a 150mm de largura e 130mm a 150mm de altura, colocados em bases granulares ou cimentadas aparelhadas com areia. Após a pavimentação com esta tecnologia há a necessidade fundamental de cobrir as juntas existentes com rejunte, havendo o uso de materiais específicos como pó de pedra (BALBO, 2007).

O Solo Arenoso Fino Laterítico (Figura 10) caracteriza-se como uma junção natural de areia e argila, ou de um composto artificial de componentes similares. O material granulométrico é normalmente descontínuo, devendo o solo possuir comportamento laterítico LA, LA´ ou LG´, segundo a classificação MCT (BERNUCCI ET.AL, 2022).

O Solo Brita, também denominado por Solo Agregado (Figura 11), define uma junção distinta de componentes, uma vez que, quando determinado material não apresenta as características desejadas para ser utilizado na pavimentação, como excesso de argila, utilizam-se agregados diversos, como britas ou pedregulhos para modificar estas propriedades (BALBO, 2007).

O solo Saprolítico (Figura 12) compõe-se de solos residuais associados à rocha matriz da camada inferior, usualmente encontradas em regiões litorâneas, como alguns estados da costa brasileira. Frequentemente, são utilizados com as características naturais que apresentam, não havendo manipulação significativa de suas propriedades (BALBO, 2007).

O Solo Laterítico Concrecionado (Figura 13) apresenta características complexas no que se refere à propriedade e emprego deste material, uma vez que consiste na junção de sílica, quartzo, e outros agregados específicos, não convencionais, cujas características mecânicas são manipuladas por meio de processos como a cimentação (BALBO, 2007).

Materiais empregados em nas camadas inferiores dos pavimentos asfálticos:

Figura 5 - Brita Graduada Simples



Figura 6 - Bica Corrida



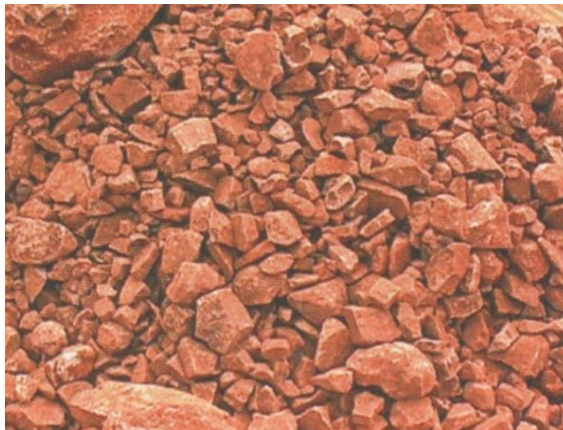
Fonte: Pedreira Beira Rio, 2023.

Figura 7 - Macadame Hidráulico



Fonte: Balbo, 2007.

Figura 8 - Macadame Seco



Fonte: Bernucci et.al, 2022.

Figura 9 - Paralelepípedo



Fonte: Pedras Ouro e Prata, 2023.

Figura 10 - Solo Arenoso Fino



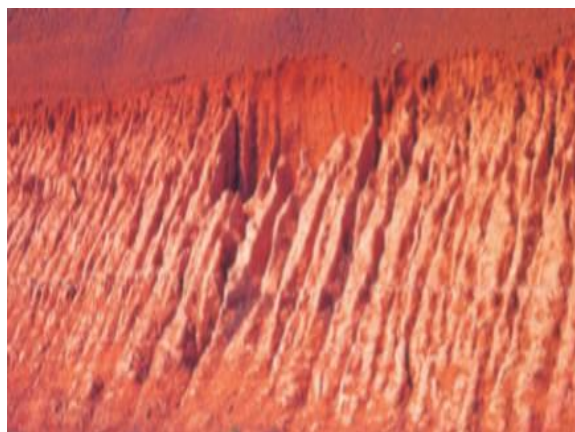
Fonte: Villibor e Alves, 2023.

Figura 11 - Solo Brita



Fonte: Original Pedras, 2023.

Figura 12 - Solo Saprolítico



Fonte: Villibor e Alves, 2023.

Figura 13 - Solo Laterítico Concrecionado



Fonte: Mundo Educação, 2023.

2.5 Especificações dos materiais empregados nas camadas inferiores de pavimentação asfáltica

2.5.1 Reforço do subleito

Os materiais empregados na camada de reforço do subleito, provenientes de jazidas, devem apresentar características mecânicas superiores àquelas do subleito e ter expansão máxima de 1%. O ensaio Índice Suporte Califórnia (ISC) mínimo será determinado pelo menor valor verificado nas três energias de compactação, correspondendo aos ensaios da AASHTO T-99, Proctor Intermediário e AASHTO T-180. (DAER, 1998).

No que se refere às exigências do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, os materiais constituintes devem atender a critérios técnicos e econômicos, mantendo-se dentro dos limites de disponibilidade, expansão menor ou igual a 2%. O ensaio de compactação deve seguir a energia do Método B (pelo método de energia intermediária) e o valor do ISC deve ser obtido com a mesma energia (DNIT, 2010). De acordo com Villibor e Alves (2019), o Índice de Grupo deverá ser igual ou menor ao valor verificado no subleito. Já o ensaio Mini-CBR ou CBR deve apresentar índice superior ao verificado no subleito e máxima expansão de 1%.

Na Tabela 1 constam as propriedades e a hierarquização dos grupos MCT para o uso rodoviário. A primeira parte refere-se ao comportamento dos solos obtido através dos ensaios. Na segunda parte consta a hierarquização dos grupos dos solos

para utilização em camadas de pavimentos, na qual o grupo LA' mostra-se mais recomendado ao uso em camadas diversas. Os grupos de solos Não Lateríticos são inferiores, e alguns como NS' e NG' não podem ser usados nas camadas (ALVES; VILLIBOR, 2019).

Tabela 1 - Propriedades e utilização dos grupos de solo da classificação MCT

Designação		Granulometrias típicas Designações do T1-71 do DAER-SP									
		areias siltes (q, s)	areias siltosas	siltes (k, m) siltes arenosos	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltes argilosos	areias	areias argilosas	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltes argilosos			
k=caulínítico m=micácio s=serícítico q=quartzoso											
COMPORTAMENTO		N= Não Laterítico			L= Laterítico						
GRUPO MCT		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'			
Propriedades	MINI-CBR (%)		M, E B, M	E B B	M, E E E E M B, M E	E	E	M,	E B B B B B, M	E, EE B B B B, M B	E B B M, B B B
	EXPANSÃO (%)		B	B, M	M				B, M	B	B
	CONTRAÇÃO (Ct)		M, E	B	B, M				B, M	B, M	B
	COEF. DE PERMEABILIDADE (k)		E	B, M	B, M				B	B	B
COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)											
Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal			EE= Muito Elevado E=Elevado			M= Médio B= Baixo					
Utilização*	Base de pavimento		n	4°	n				2°		3°
	Reforço do subleito compactado		4°	5°	n				2°		3°
	Subleito compactado		4°	5°	7°	n		n	2°	1°	3°
	Aterro (corpo) compactado		4°	5°	6°	6°		7°	2°	1°	3°
	Proteção à erosão		n	3°	n	n		n	n	2°	1°
	Revestimento primário		5°	3°	n				4°		2°
*A "utilização" é representada em prioridade de escolha (1°, 2°, 3°...), sendo "n" não recomendado											

Fonte: Villibor e Alves, 2019.

2.5.2 Sub-Base e Base

Conforme o Manual de Especificações Gerais do DAER (1998), para a sub-base os materiais usados das Classes 1, 2 e 3, que estão classificadas nas Tabelas 2 e 3, não podem ter perda superior a 12% no Ensaio de Sanidade e expansão máxima de 1%. Os materiais da Classe 4 que são obtidos de jazidas devem apresentar ISC igual ou maior a 30% e o Equivalente de Areia (EA) igual ou superior a 20%.

Tabela 2 - Especificações das classes 1,2 e 3 para o uso na sub-base

PENEIRAS	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
2"	100	-	-
1"	75 - 95	-	-
3/8"	-	100	-
nº4	30 - 60	50 - 100	100
nº30	12 - 24	20 - 40	25 - 55
nº200	0 - 15	0 - 20	0 - 25

Fonte: DAER, 1998.

Tabela 3 - Valores de ISC e EA para o uso na sub-base

ENSAIO	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
ISC	≥ 30	≥ 20	≥ 20
EA	≥ 25	≥ 25	≥ 20

Fonte: DAER, 1998.

Conforme DAER (1998), os materiais usados para a base devem apresentar valor máximo de 40% para Abrasão Los Angeles e valor máximo de 10% para o Ensaio de Sanidade. No caso de misturas com solos, devem apresentar IP menor de 6%, LL menor ou igual a 25%, e expansão menor ou igual a 0,5%. As bases granulares são classificadas como Classe A, B ou C.

A classe A deve ser constituída de pedra britada ou seixo britado. Deverá possuir no mínimo 90% de partículas no seu peso e, no mínimo, duas faces britadas. Devem ter o valor mínimo de 100% para o ISC e apresentar mais de 50% no EA. Possuem o percentual em peso do agregado conforme ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Faixas Granulométricas da Classe A

TAMANHO DA PENEIRA	PORCENTAGEM QUE PASSA	
	TAMANHO MÁXIMO 1 1/2'	TAMANHO MÁXIMO 3/4"
2"	100	-
1 1/2'	90-100	-
1"	-	100
3/4"	50-85	90-100
n°4	30-45	35-55
n°30	10-25	10-30
n°200	2-9	2-9

Fonte: DAER, 1998.

A classe B deve possuir no mínimo 70% em peso do material e duas faces britadas, possuir ISC com o mínimo de 80% e EA com o mínimo de 30%. A composição percentual em peso deve estar incluída numa das faixas na Tabela 5.

Tabela 5 - Faixas Granulométricas da Classe B

TAMANHO DA PENEIRA	PORCENTAGEM QUE PASSA	
	TAMANHO MÁXIMO 1 1/2'	TAMANHO MÁXIMO 3/4"
2"	100	-
1 1/2'	90-100	-
1"	-	100
3/4"	50-85	90-100
n°4	25-45	35-55
n°30	10-25	10-30
n°200	2-9	2-9

Fonte: DAER, 1998.

O material da Classe C deve ter no mínimo 25% em peso de partículas e duas faces britadas, além de possuir um ISC com o valor mínimo de 80% e EA com o mínimo de 30%. As curvas granulométricas devem se enquadrar nas faixas da Tabela 6.

Tabela 6 - Faixas Granulométricas da Classe C

PENEIRA	PORCENTAGEM QUE PASSA	
	2"	-
1"	100	100
3/8"	50-85	60-100
nº4	35-65	50-85
nº30	17-34	28-50
nº200	5-15	5-20

Fonte: DAER, 1998.

De acordo com DNIT (2010), a sub-base deve apresentar um IG igual ao valor 0, ISC maior ou igual a 20%, expansão menor que 1%, ensaio de compactação equivalente a energia Intermediária. Ressalta-se, em relação a este autor, que, caso o solo seja laterítico, o IG pode apresentar valoração diferente de 0 e expansão maior que 1%, conquanto que o resultado do teste de expansão não exceda 10%.

Conforme DNIT (2022), a base deve apresentar expansão máxima de 0,5%, Módulo de Resiliência e Deformação Permanente segundo especificações de projeto, ISC entre 60% e 80%, de acordo com a quantificação do número N. O Limite de Liquidez deve ser menor ou igual a 25% e o Índice de Plasticidade menor ou igual a 6%. O ensaio de equivalência de areia deve ser maior que 30% caso os limites de LL e IP forem excedidos. No caso de ser feito o ensaio Abrasão Los Angeles (LA) no material, o desgaste não pode ser maior do que 55%.

Nas tabelas 7 e 8 constam as classificações G-MCT das classes GL (Granular com finos com comportamento laterítico) e GN (Granular com finos com comportamento não laterítico) com as características, propriedades e a hierarquia da utilização nas camadas rodoviárias. Na classe de solos lateríticos, os materiais que tem o melhor desempenho para utilização em base e sub base são o Ps-LA' e o Sp-LA'. Já na classe dos solos não lateríticos, os materiais com melhor desempenho para base e sub base são os do grupo Ps-NA' e Sp-NA' (ALVES; VILLIBOR, 2019). Nas Tabelas 9 e 10 são apresentadas as exigências para a base e sub-base, de acordo com Villibor e Alves (2019) para emprego em pavimentos econômicos.

Tabela 7 - Propriedades e hierarquização de uso dos grupos de solos da classe GL.

CLASSIFICAÇÃO G-MCT			CLASSE GL (GRANULAR)								
COM FINOS DE COMPORTAMENTO LATERÍTICO)											
TIPO GRANULOMÉTRICO			Ps: Pedregulho com solo; Sp: Solo com pedregulho; Gf: Granular fino								
GRUPOS MCT DOS FINOS ($\varnothing < 2,0\text{mm}$)			LA			LA'		LG'			
CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS GRANULARES			Pedregulho com areia laterítica	Areia laterítica com pedregulho	Solo granular fino de areia laterítica com pedregulho	Pedregulho com solo arenoso laterítico	Solo arenoso laterítico com pedregulho	Solo granular fino arenoso laterítico com pedregulho	Pedregulho com solo argiloso laterítico	Solo argiloso laterítico com pedregulho	Solo granular fino argiloso laterítico com pedregulho
			GRUPO G-MCT			Ps-LA	Sp-LA	Ps-LA'	Sp-LA'	Sp-LA'	Gf-LA'
PROPRIEDADES	Suporte CBR	E, EE		E	E, EE		E, EE	M, E		E	
	Expansão CBR (E)	B		B	B		B	B		B	
	Contração* (C)	B		B	B		B, M	B, M		M	
	Coef. Permeabilidade* (k)	E		M, E	E		M, E	M, E		B, M	
	Propriedades estimadas em CPs na MEASmáx da EN	EE= Muito Elevado E= Elevado M= Médio B=Baixo									
UTILIZAÇÃO	Base e Sub-base	2°		5°	1°		4°	3°		6°	
	Reforço e/ou subleito	1°		4°	2°		5°	3°		6°	
	Proteção à erosão e revestimento primário	n		5°	1°		3°	2°		4°	
	Utilização: prioridade de escolha (1°, 2°, 3°...) n= não recomendado										

* Valores da MCT da Contração (C) e Coef. De Permeabilidade (K) da fração fina do solo granular ($\varnothing < 2,0\text{mm}$)

Fonte: Villibor e Alves, 2019.

Tabela 8 - Propriedades e hierarquização de uso dos grupos de solos da classe GN.

CLASSIFICAÇÃO G-MCT											CLASSE GN		
(GRANULAR COM FINOS DE COMPORTAMENTO NÃO LATERÍTICO)													
TIPO GRANULOMÉTRICO		Ps: Pedregulho com solo											
GRUPOS MCT DOS FINOS ($\varnothing < 2,0\text{mm}$)		NA			NA'			NS'			NG'		
CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS GRANULARES		Pedregulho com areia não laterítica	Areia não laterítica com pedregulho	Solo granular fino de areia não laterítica com pedregulho	Pedregulho com solo arenoso não laterítico	Solo arenoso não laterítico com pedregulho	Solo granular fino arenoso não laterítico com pedregulho	Pedregulho com solo siltoso não laterítico	Solo siltoso não laterítico com pedregulho	Solo granular fino siltoso não laterítico com pedregulho	Pedregulho com solo argiloso não laterítico	Solo argiloso não laterítico com pedregulho	Solo granular fino argiloso não laterítico com pedregulho
		GRUPO G-MCT		Ps-NA	Sp-NA	Gf-NA	Ps-NA'	Gf-NA'	Gf-NA'	Ps-NS'	Sp-NS'	Gf-NS'	Ps-NG'
PROPRIEDADES	Suporte CBR	E, EE		E	E, EE		E, EE	M, E		E	M, E		E
	Expansão CBR (E)	B		B	B		B	B	B, M	B	B	B, M	M, E
	Contração* (C)	B		B	B		B	B, M		M	B, M		M
	Coef. Permeabilidade* (k)	E		M, E	E		M	M, E		B, M	M, E		B, M
	Propriedades em CPs na MEASmáx da EN	EE= Muito Elevado E= Elevado M= Médio B=Baixo											
UTILIZAÇÃO	Base, sub-base, reforço e/ou subleito (hierarquização preliminar)	2°		n	1°		n	3°		n	4°		n

* Valores da MCT da Contração (C) e Coef. De Permeabilidade (K) da fração fina do solo granular ($\varnothing < 2,0\text{mm}$)

Fonte: Villibor e Alves, 2019.

Tabela 9 - Critérios do Solo Laterítico Agregado Contínuo para base e sub-base.

MISTURA OU SOLO INTEGRAL	Peneiras		DER-SP: ET-DE-P00/014						DNIT:098/2007-ES	
			Faixas Granulométricas (% que passa)							
	ASTM	mm	I	II	III	IV	V	VI	A	B
	2"	50,8	100	100		-			-	-
	1"	25,4	-	75-95	100	100	100	100	100	100
	3/8"	9,5	30-65	40-75	55-85	60-100	-	-	40-85	60-95
	n°4	4,8	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100	20-75	30-85
	n°10	2	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	15-60	15-60
	n°40	0,42	15-30	15-30	15-30	20-50	20-55	30-70	40-45	10-45
	n°200	0,075	2-8	5-15	5-20	5-20	8-25	10-25	5-30	5-30
% do material que passa na peneira n°200 < 2/3 da que passa na peneira n°40										

PROPRIEDADES	Parâmetros		Valores Admissíveis		Método de Ensaio
			Base	Sub-base	
Fração fina Ø<2,0mm	Classificação MCT		LA', LA, LG'		DER M-196/89
Fração grossa Ø>2,0mm	Abrasão Los Angeles		<50%	<70%	DER M-24/6
	Faixas I a IV				
	Faixas A e B				
Solo integral	Durabilidade do agregado		Sulf. de sódio < 20%		DER ME 089
			Sulf. de magnésio < 30%		
Solo integral	CBR		>70% (EM)	>30% (EI)	DER M-53/71
	Expansão		<0,3% (EM)	<0,3% (EI)	

El e EM: energia intermediária e modificada

Fonte: Villibor e Alves, 2019.

Tabela 10 - Critérios do Solo Laterítico Agregado Descontínuo para base e sub-base.

GRANULOMETRIA			PROPRIEDADES				
Peneiras		% que passa	Parâmetros	Valores Admissíveis		Método de Ensaio	
ASTM	mm	DER-SP: ET-DE-P00/003		Base	Sub-base		
1"	25,4	100	Fração fina Ø<2,0mm	Classificação MCT	LA', LA, LG'		DER M-196/89
3/8"	9,5	50-75		Mini-CBR _{hm}	>30% (EI)	(EI)	DER M-192/89
n°4	4,8	40-70		Expansão	<0,3 (EI)	(EI)	
n°10	2	35-65		Contração	0,1 a 0,8% (EI)	(EI)	DER M-193/89
n°40	0,42	20-60	Fração grossa Ø>2,0mm	Abrasão Los Angeles	< 65%	-	DER M-24-6
n°200	0,075	5-35		Durabilidade agregado*	Sulf. de sódio < 20%		DNER ME 089
EI e EM: energia intermediária e modificada			Solo integral	Sulf. de magnésio < 30%			
				CBR	>70% (EM)	>30% (EI)	DER M-53-71
			Expansão	<0,3% (EM)	<0,3% (EI)		

Fonte: Villibor e Alves, 2019.

2.6 Ensaios tradicionais para caracterização de materiais utilizados em camadas inferiores de pavimentos asfálticos

2.6.1 Granulometria por peneiramento

A distribuição dos agregados é determinada usualmente por peneiramento, podendo ser feita também com imagens e métodos mais modernos para caracterização de frações (BERNUCCI *et al.*, 2019). O peneiramento separa os grânulos segundo seu tamanho através de diversas malhas com espaços quadrados, eis que são muito variados os formatos dos grãos, que são divididos em muito grossos, grossos, finos e muito finos. Em cada peneira, as frações menores passam e as maiores ficam acumuladas (CAPUTO e CAPUTO, 2015). O processo de peneiramento é aplicável até o diâmetro mínimo de 0,074mm (peneira de nº200).

Segundo Pinto (2006), para a análise granulométrica da fração passante na peneira de nº200 emprega-se o processo de sedimentação. Esse processo se baseia na Lei de Stokes que mistura em provetas o conjunto adicionado de água. Leva-se em conta que os grãos mais pesados são os primeiros a sedimentar por ação da gravidade. Posteriormente, o uso de um densímetro determina a densidade de suspensão daquela amálgama.

A análise granulométrica determina as dimensões das partículas e em que proporção elas compõem aquele solo. Conforme Caputo e Caputo (2015), a curva granulométrica é traçada em um diagrama semilogarítmico em que as abscissas marcam os logaritmos das dimensões das partículas e as ordenadas marcam as porcentagens de material passante. De acordo com a NBR 6502:1995 (ABNT,1995) as frações granulométricas são assim classificadas:

- Pedregulho: entre 2mm e 60mm;
- Areia: entre 0,06mm e 2mm;
- Silte: entre 0,002mm e 0,06mm;
- Argila: menor do que 0,002mm.

Conforme Bernucci *et al.* (2019), a distribuição granulométrica dos agregados pode ser:

a) graduação densa ou bem graduada: apresenta contínua variedade de todos os tamanhos.

b) graduação aberta: distribuição contínua, mas com deficiência de finos, resultando em vazios.

c) graduação uniforme: a maioria das partículas com a faixa dos grãos bem estreitos, mostra uma curva íngreme.

d) graduação descontínua: a ausência de grânulos médios causa degrau na curva.

2.6.2 Limites de Atterberg

A fração fina do solo encerra características muito importantes em termos de comportamento, as quais não são reveladas pela simples distribuição granulométrica. Quanto mais fino for o solo, maior será sua dependência de umidade e mais distinta será sua consistência. Quando o solo for muito úmido, ele vai se comportar como líquido, e, na medida que o solo vai perdendo água, ele se torna plástico. Após ele ficar mais seco torna-se quebradiço. São os chamados limites de consistência (PINTO, 2006).

O limite de Liquidez (LL) separa o estado líquido do estado plástico. Para determinar o LL, o ensaio (ABNT NBR 6459) utiliza o aparelho de Casagrande, que exige o número de 25 golpes necessários para fechar uma ranhura no solo em uma concha. Já o limite de plasticidade (LP) separa o estado plástico do quebradiço. Seu ensaio (ABNT NBR 7180) verifica o menor teor de umidade que permite moldar à mão um cilindro de solo de 3mm de diâmetro. O Índice de Plasticidade (IP) é a diferença entre LL e LP, representando a faixa de umidade em que o solo se mantenha plástico (PINTO, 2006).

2.6.3 Sanidade

Segundo Bernucci *et al.* (2022), alguns agregados sofrem desintegração por exposição a intempéries, por força de inchamento da rocha. Tal processo de deterioração produz grande quantidade de finos, o que altera sobremodo a distribuição granulométrica e causa redução na resistência da massa rochosa. O ensaio de sanidade ataca o agregado com solução química de sulfato de sódio ou de

magnésio, com posterior secagem em estufa. Disto resulta uma perda de massa que não deve ser maior do que 12%.

2.6.4 Abrasão Los Angeles

O manuseio e tráfego de agregados submete-os a quebras e abrasão. Assim, são desejáveis agregados resistentes a quebras, esmigalhamento e desintegração. Os agregados próximos à área superior do pavimento requerem resistência à abrasão maior do que os dirigidos a camadas inferiores (BERNUCCI *et al.*, 2022). Daqui se deduz que a distinção entre os mais e os menos resistentes serve a propósitos de economia, eis que separa os mais resistentes para as camadas que mais exigem, as superiores. Desta forma, o resíduo mais abrasivo é aproveitado nas camadas inferiores.

O ensaio mais usado para medir resistência à abrasão é o Los Angeles: uma amostra de agregado é submetida a 500 ou 1000 revoluções em um cilindro padronizado onde esferas de aço são adicionadas para induzir impactos nas partículas. O resultado é avaliado pela redução de massa nos agregados retidos na peneira, em relação à massa inicial da amostra. Em camadas de bases e revestimentos asfálticos, limitam-se os valores de abrasão LA entre 40 e 55%.

2.6.7 Compactação

O ensaio de Proctor determina os parâmetros ótimos de densidade e umidade, que representam a máxima densidade seca em determinada energia. Emprega-se compactação "normal", "intermediária", ou "modificada" aplicada por meio de soquetes (VILLIBOR e ALVES, 2019).

Segundo Caputo e Caputo (2015), o Ensaio Normal de Proctor, padronizado pela ABNT NBR 7182, consiste em compactar a amostra num cilindro metálico, que pode variar sua dimensão dependendo da granulometria do material retido ou passante na peneira 4,8mm. Podem ser feitas em energias diferentes, usando combinações de números de camadas, número de golpes por camadas e soquetes que variam. São compactados diversos corpos de prova com diferentes teores de umidade, obtendo-se a curva de compactação, a qual possui formato de sino e relaciona o peso

específico aparente seco com os teores de umidade (CAPUTO e CAPUTO, 2015). No ponto mais elevado da curva tem-se o peso específico aparente seco máximo, cujo teor de umidade correspondente é denominado de “umidade ótima”.

2.6.5 Índice de Suporte Califórnia – ISC ou CBR (*California Bearing Ratio*)

O ensaio foi concebido para avaliar a resistência de determinado material perante deslocamentos, fazendo uso de penetrometria em laboratório. São selecionados materiais granulares cuja resistência é comparada com a do "material padrão", equivalente a 100%. A capacidade de suporte ISC é correlacionada empiricamente com o desempenho avaliado no campo.

A espessura mínima da estrutura (base) vai depender do índice de suporte do subleito, a fim de limitar as tensões que ele sofre e protegê-lo. O ISC é expresso em porcentagem e relaciona a pressão necessária para produzir a penetração de um pistão em um CP de material com a pressão que seria necessária para a mesma penetração no material padrão referencial (BERNUCCI *et al.*, 2022)

Regido pela norma DNIT 172/2016, o procedimento ISC segue três etapas:

- Moldagem do CP: o material peneirado a 3/4" é compactado em molde cilíndrico com 12,5cm de altura por 15cm de diâmetro.
- Imersão: o cilindro com o conteúdo compactado é imerso em água por 4 dias. A cada 24 horas um extensômetro mede a extensão axial da amostra em relação à altura inicial.
- Penetração: o CP é retirado do banho e escorrido por 15 minutos. O molde é então prensado e penetrado por um pistão de 5cm de diâmetro sob velocidade de 1,25mm/min para registrar o deslocamento resultante. A curva pressão-penetração costuma acentuar-se ao passar da fase elástica para a fase plástica.

Ainda, segundo Bernucci *et al.* (2022), os solos com expansividade acima de 2% são muito sujeitos a deformações, sendo recomendada expansão máxima de 1% para reforço de subleito e 0,5% para base e sub-base. Desta forma, é desejável uma diferença mínima entre a capacidade de suporte antes da imersão e a verificada após imersão.

2.6.6 Equivalente de areia

Segundo Bernucci *et al.* (2022), certos agregados graúdos contém materiais nocivos presentes na sua superfície, tornando-os impróprios à utilização em pavimentos, pois esse pó ou argila afeta a adesividade do ligante asfáltico ao agregado. O ensaio de equivalente de areia verifica a proporção desse material presente em amostras de agregados miúdos. No ensaio, uma amostra de agregados com tamanhos menores de 4,8mm é medido numa cápsula padrão e colocado numa proveta contendo uma solução de cloreto de cálcio-glicenada-formaldeído, mantida em repouso por 20 minutos. Após, o recipiente é agitado por 30 segundos, e, em seguida, um novo repouso de 20 minutos. Posteriormente, é verificada a altura do material floculado em suspensão, e na proveta é colocado um bastão para determinar a altura de agregado depositado por sedimentação.

2.7 Classificações MCT e G-MCT

2.7.1 Solos Tropicais

De acordo com Villibor e Alves (2019), os solos lateríticos (later, do latim: cor de tijolo) são provenientes de laterização de partes drenadas em regiões tropicais úmidas. São solos maduros, resistentes à erosão, ricos na parte fina, em argila e concentração de hidróxido e óxido de ferro, o que lhes confere a cor de ferrugem. A fração de areia com frequência contém quartzo.

Os solos saprolíticos resultam da decomposição da rocha matriz, são solos residuais jovens, com mineralogia complexa e sujeitos à erosão. Já os solos transportados provêm da deposição de materiais em baixadas, carregados pela água, gravidade ou ventos. Apresentam variada granulometria. Seus principais exemplos são as areias e pedregulhos fluviais e marinhos (VILLIBOR e ALVES, 2019).

Em se tratando da aplicação prática dos solos tropicais, no que se refere ao processo de pavimentação, destaca-se o sistema de classificação MCT. Trata-se de um conjunto específico de técnicas que permite a avaliação sistemática dos componentes que integram os solos considerados, para fins de obtenção de pavimentos consideravelmente mais econômicos (VILLIBOR E ALVES, 2019).

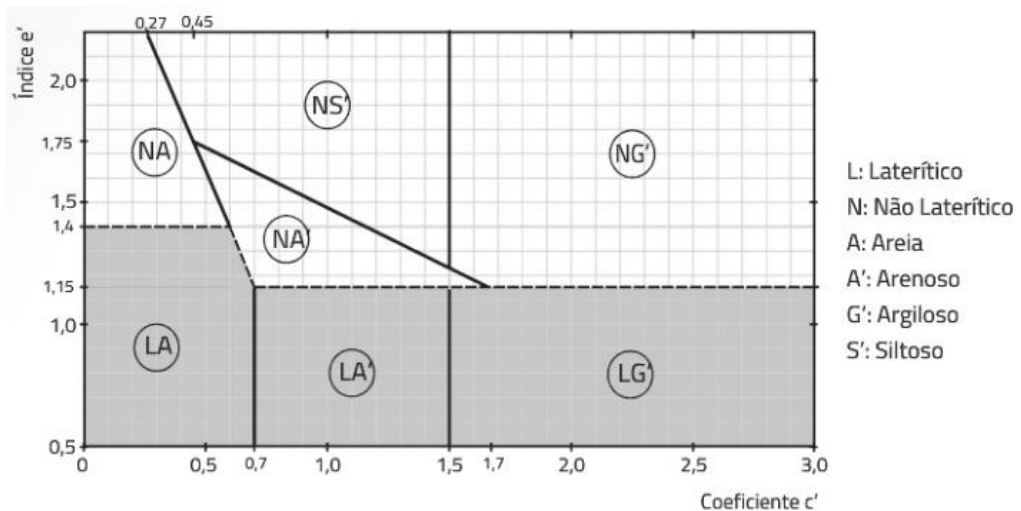
2.7.2 Classificação MCT

A classificação MCT deve seu nome ao uso de corpos de prova em miniaturas (M), que sofrem compactação (C) e têm origem em solos tropicais (T). Conforme Villibor e Alves (2019) a divisão dos solos segue dois grupos, o de comportamento laterítico, designados como classe L, e o de comportamento não laterítico que configura a classe N, subdivididos em sete subgrupos:

- Areia Laterítica Quartzosa (LA): mostra pequena proporção de finos, boa resiliência, baixa argilosidade e fraca coesão. Elas podem ter a cor arroxeada, rósea ou amarela devido à alta concentração de óxido de ferro.
- Solo Arenoso Laterítico (LA'): possui teor médio de finos, elevada resiliência e razoável coesão; argilosidade média. É o melhor solo do grupo MCT para uso em bases e sub bases de pavimentos.
- Solo Argiloso Arenoso (LG'): por conta da proporção de argilas e siltes, apresenta menor resiliência, capacidade de suporte, baixa aderência e alta argilosidade.
- Areia Não Laterítica (NA): consta de areias e siltes constituídos de quartzo e/ou mica. Apresenta melhores características quanto menor for a proporção de areias finas. Fraca coesão e baixa argilosidade.
- Solo Arenoso Não Laterítico (NA'): formado por areias quartzosas, tem argilosidade média e pode conter mica. Quando o solo for bem graduado, ele é adequado ao uso em pavimentos, já quando o material tem elevada porcentagem passante na peneira de 0,075mm, ele se torna inadequado para uso em pavimentos por ser muito expansivo, sujeito a erosão hidráulica e muito resiliente.
- Solo Siltoso Não Laterítico (NS'): são siltes e siltes arenosos, com argilosidade média ou baixa. Devido à carência de finos, não são aplicáveis para pavimentos.
- Solo Argiloso Não Laterítico (NG'): consiste em argilas, argilas arenosas, argilas siltosas e siltes argilosos com alto coeficiente de argilosidade. Assim como as argilas tradicionais, apresenta elevada expansibilidade, plasticidade, compressibilidade e contração, não sendo indicado na utilização em camadas de pavimentos.

Segundo Villibor e Alves (2019), através do ensaio de compactação Mini-MCV, são obtidos a curva de deformabilidade do solo, os coeficientes de argilosidade c' e d' , que é usado para o cálculo do índice de laterização e' . Esse último índice, juntamente com a perda de massa por imersão (parâmetro P_i), indica se o solo tem comportamento laterítico ou não. Na Figura 14 está ilustrada a classificação dos grupos de solos MCT. No eixo das ordenadas está o índice e' , e no eixo das abscissas está o coeficiente c' que se refere à granulometria.

Figura 14 - Classificação de solos MCT



Fonte: Villibor e Alves, 2019.

2.7.3 Classificação G-MCT

Desenvolvida para solos tropicais de granulação grossa (entre 4,8 e 50mm), a G-MCT fundamenta-se nas propriedades da fração fina (MCT) e na resistência, suporte e expansão da fração grossa segundo os ensaios tradicionais. Os grãos maiores respondem pela transmissão de esforços, enquanto a fração fina é responsável pelo comportamento da camada compactada a longo prazo.

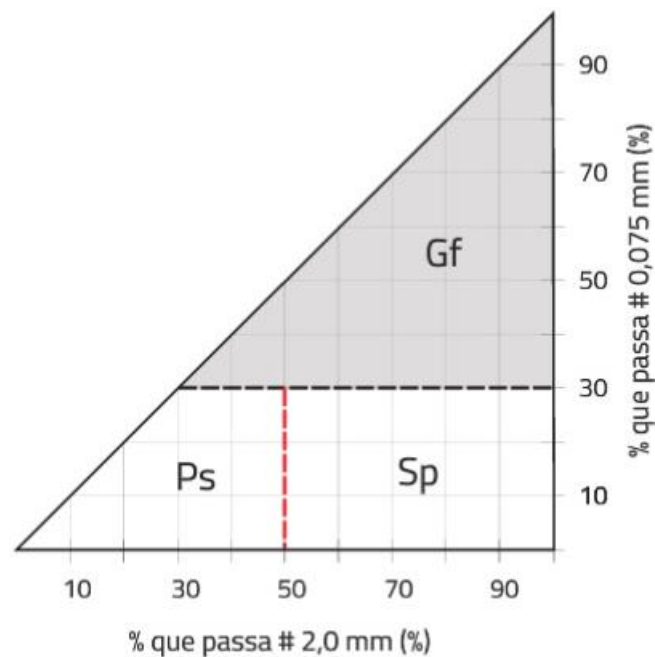
Assim, a G-MCT baseia-se na definição dos tipos granulométricos do solo integral e na classificação MCT da fração que passa na peneira de 2mm (VILLIBOR e ALVES, 2019). Os tipos são os seguintes:

Ps: Pedregulho com solo, quando menos de 50% passa em peneira de 2 mm e menos de 30% passa em peneira de 0,075mm.

Sp: Solo com pedregulho, quando mais de 50% passa em peneira de 2 mm e menos de 30% passa em 0,075mm.

Gf: Granular fino, com material granular com média ou alta quantidade de finos. Neste caso, menos de 100% passa na peneira de 2mm e mais de 30% passa em 0,075mm.

Figura 15 - Tipos granulométricos G-MCT



Fonte: Villibor e Alves, 2019.

Ainda segundo Villibor e Alves (2019), para classificar classes e grupos de G-MCT, relaciona-se o tipo de solo (Ps, Sp ou Gf) com a classificação MCT de seus finos, conforme a Tabela 11. Entre outros, seguem os seguintes exemplos:

a) Solo Ps com finos do grupo LA':

Classe GL, designada como granular com finos lateríticos.

Grupo G-MCT: Ps-LA', designado como pedregulho com solo arenoso laterítico.

b) Solo Sp com finos do grupo NS':

Classe GN, representada como granular com finos não lateríticos.

Grupo G-MCT: SpNS', solo siltoso não laterítico com pedregulho.

Tabela 11 - Classificação G-MCT.

CLASSIFICAÇÃO G-MCT									
Granulometria		Grupo MCT da parte fina da amostra							
% que passa		Tipos	LA	LA'	LG'	NA	NA'	NS'	NG'
# n°10 (2,00mm)	# n°200 (0,075mm)		Classe GL			Classe GN			
Grupo G-MCT do solo de granulação grossa									
<50	<30	Ps	Ps-LA	Ps-LA'	Ps-LG'	Ps-NA	Ps-NA'	Ps-NS'	Ps-NG'
>50	<30	Sp	Sp-LA	Sp-LA'	Sp-LG'	Sp-NA	Sp-NA'	Sp-NS'	Sp-NG'
<100	>30	Gf	Gf-LA	Gf-LA'	Gf-LG'	Gf-NA	Gf-NA'	Gf-NS'	Gf-NG'

Fonte: Villibor e Alves, 2019.

2.8 Seixos e Desassoreamento de rios

De acordo com o Portal do Concreto (2018), os agregados são materiais classificados segundo três critérios:

- Granulometria: a curva granulométrica destaca a classe de grãos e miúdos, de acordo com o tamanho específico do grão a ser utilizado;
- Natureza: os agregados podem ser classificados em naturais, ou artificiais, dependendo da necessidade de mão de obra para obtenção do material.
- Massa específica: estabelece três agrupamentos, leves, normais e pesados.

Neste contexto, observa-se a presença de um agregado de possível importância para a engenharia civil, pois permite uma série de vantagens dinâmicas e relativas ao processo pelo qual se obtém: os seixos. Estes consistem em materiais rochosos que se apresentam como a resultante de grande ajuntamento de minerais sedimentados que se desgastam sob o efeito de erosão líquida – choque com água de rios, principalmente – e alocam-se ao longo do percurso fluvial (PALIMANAN, 2020). A Figura 16 apresenta uma ilustração de seixos.

Figura 16 - Seixos



Fonte: Palimanan, 2020.

A esta temática relaciona-se o desassoreamento dos rios, em que predomina o processo de retirada de sedimentos, minerais, e outros materiais que se encontram depositados no leito. Dito procedimento também pode ocasionar preservação ambiental, além de conservar a navegabilidade dos rios e a conservação de suas margens. Desta forma, de acordo com Smith *et al.* (2019), tais eventos promovem uma série de alterações que exigem intensa análise quanto aos recursos, insumos e tecnologias utilizadas, devido ao impacto ambiental resultante. Um dos métodos utilizados para a extração de seixos no processo de desassoreamento de rios inclui o emprego de bombas de dragagem manuseadas por colaboradores qualificados, posteriormente sendo armazenados em balsas e levados ao destino designado, ilustrado na Figura 17 (PINHEIRO, 2016).

Figura 17 - a, b, c - Desassoreamento de rios



Fonte: Pinheiro, 2016.

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os agregados artificiais são processados com o uso de diversos materiais, como britas, cascalhos e seixos que ficam retidos na peneira nº10 (2,0mm). Já os agregados naturais, ou seja, os encontrados in natura sem necessidade de transformação química ou física incluem principalmente os pedregulhos e os seixos rolados.

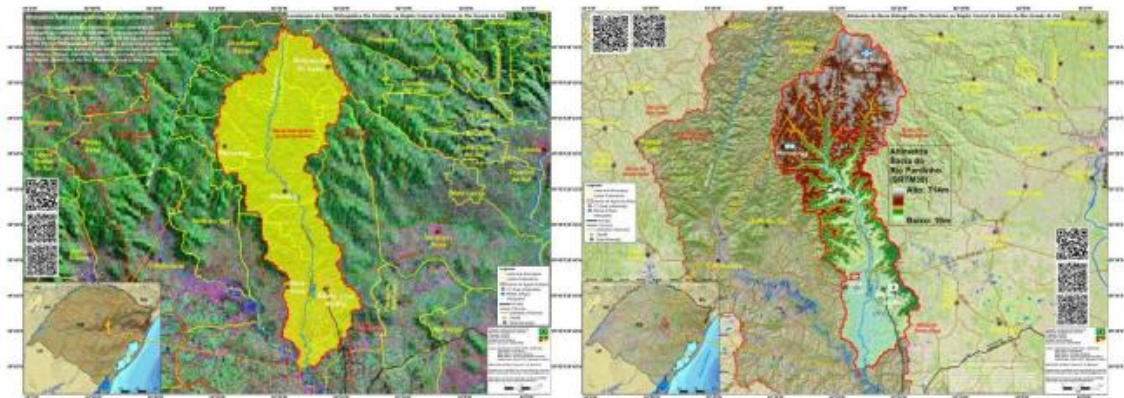
No Rio Grande do Sul, foi instituído o Programa Estadual de Estímulo à Limpeza e Desassoreamento dos Corpos Hídricos, que regula licenciamentos ambientais e estabelece incentivos e condições para o desassoreamento dos rios, visando à redução das enchentes e autorizando, inclusive, os municípios a usar os materiais em obras públicas (DECRETO 52.701, publicado no DOE de 12.11.2015).

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição Geral do Material de Estudo

A região do Rio Grande do Sul denominada Encosta Inferior do Nordeste inclui o Vale do Rio Pardo. O rio Pardinho, afluente principal do rio Pardo, consiste na fonte de água potável de Santa Cruz do Sul, município situado a 155km de Porto Alegre. A bacia está ilustrada na Figura 18.

Figura 18 - Localização e drenagem da bacia do rio Pardinho



Fonte: Diniz et al. (2014).

O material objeto do estudo foi seixo rolado proveniente do rio Pardinho junto à rodovia BR 471 (Figura 19), com as coordenadas geográficas latitude 29°38'36.40"Sul e longitude 52°27'48.20"Oeste. A área consiste em uma planície de inundação rica em aluviões. De acordo com o mapa do CPRM - Serviço Geológico do Brasil, a região é caracterizada por depósitos aluvionares (Q2a), compostos por sedimentos areno-argilosos inconsolidados, finos a médios, restos de matéria orgânica, seixos, cascalhos, areias e siltes. Pontualmente ocorrem matacões (BRASIL, 2008).

A classificação pedológica do solo na região é Mxo – Chernossolo Háplico Órtico. De acordo com Streck *et al.* (2008), os Chernossolos pertencem ao horizonte A escuro com alta fertilidade química. São solos profundos apresentando uma sequência de horizontes A-Bt-C ou A-Bi-C. Caracterizam-se por razoáveis teores de material orgânico, o que confere cores escuras ao horizonte superficial que é do tipo A.

Figura 19 - Localização da extração do material do rio pardinho



Fonte: Google Earth (2023).

3.2 Coleta de amostras e preparação de amostras

Foi coletada uma amostra de 130kg de seixo rolado do depósito da Secretaria de Obras e Infraestrutura da cidade de Santa Cruz do Sul. O material foi retirado com uma escavadeira do meio de uma pilha de seixos rolados, para ter uma amostra fiel ao natural (Figura 20). O material foi transportado em sacos plásticos fechados para não se perderem grânulos finos durante o transporte até o laboratório de solos da Universidade de Santa Cruz do Sul.

Figura 20 - Extração do material na Secretaria de Obras de Santa Cruz do Sul.



Fonte: Autor (2023).

Para preparação de amostras do solo foi usada a norma DAER/RS-EL 001/01 – Preparação de amostras de solos. O quarteamento foi feito de forma manual, devido ao tamanho da amostra ser superior a 45kg. O material foi seco ao ar sobre uma lona e destorroado com cuidado para não reduzir o tamanho natural das partículas de solo. Após a secagem, o material foi amontoado em formato de cone e espalhado até que ficasse em uma camada circular de espessura uniforme em todas direções. Foi introduzida uma régua no centro do monte para dividir a amostra em duas partes iguais e, novamente, a régua foi colocada perpendicularmente à primeira divisão para obter 4 partes iguais em formato de um “x” com a ajuda de uma pá. (Figura 21). Dois

quartos diagonalmente opostos foram removidos e colocados em duas bandejas metálicas para os ensaios de caracterização, como Granulometria, Limites de Liquidez e Limites de Plasticidade. Os outros dois quartos foram ensacados e guardados para os ensaios posteriores como Compactação, ISC, Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão.

Figura 21 - Quarteamento do material.



Fonte: Autor (2023).

3.3 Ensaio de laboratório

Os ensaios de Granulometria por Peneiramento, Limite de Plasticidade, Limite de Liquidez, Compactação, Índice de Suporte Califórnia, Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão foram realizados pelo autor no Laboratório de Solos da Universidade de Santa Cruz do Sul. Para os ensaios Equivalente de Areia, Abrasão Los Angeles e Sanidade, os materiais foram preparados pelo autor e realizados por cortesia da Solotec Sondagens e Ensaio Geotécnicos.

3.3.1 Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria foi feito por peneiramento de acordo com a norma DAER/RS-EL 102/01 - Análise granulométrica de agregados. Conforme a Tabela 12, a amostra foi de 20kg provenientes do material do quarteamento.

Tabela 12 - Quantidade de material.

Diâmetro máximo	Quantidade de material
2" (50,80mm)	20kg
1 1/2" (38,10mm)	15kg
1" (25,40mm)	10kg
3/4" (19,10mm)	7kg
1/2" (12,70mm)	5kg
3/8" (9,52mm)	2kg
n°4 (4,76mm)	500g
n°10 (2,00mm)	150g

Fonte: DAER, 2001.

O material foi pesado numa balança sensível a 0,01g e colocado numa bandeja metálica. As peneiras de diâmetros variados (Figura 22) foram sobrepostas, começando com a de abertura de diâmetro maior de 75mm até a menor de 0,075mm. Ao fundo, foi colocada uma bandeja para recolher o material passante da última peneira. Durante o peneiramento em movimentos horizontais e verticais, as peneiras cheias tinham o conteúdo transferido para outra bandeja. Após o peneiramento, foi feito o somatório do material retido nas peneiras com o material retido no fundo, para conferir se não houve perdas superiores a 0,5% da amostra inicial. O material constante de cada bandeja foi pesado com sua umidade higroscópica original, em seguida foi levado a estufa à temperatura de 105°C por 24 horas para obtenção do peso final da amostra seca.

Figura 22 - Conjunto de peneiras acopladas em ordem decrescente.



Fonte: Autor (2023).

A partir desses procedimentos, foi possível calcular os dados necessários para fazer a análise granulométrica do material estudado. A umidade foi calculada através da Equação 1, conforme o método DAER/RS EL 002/99. Através dos cálculos foi obtida a porcentagem passante em cada malha da peneira (Equação 2), e foi traçada a curva granulométrica em um diagrama em escala semi-logarítmica em que as abscissas marcam as dimensões das partículas e as ordenadas marcam a porcentagem de material passante.

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

h = teor de umidade, em porcentagem;

P_h = peso do solo úmido;

P_s = peso do solo seco.

$$\text{"\% que passa da amostra total"} = \frac{\text{peso acumulado do material que passa}}{\text{"amostra total seca"}} \times 100 \quad (2)$$

3.3.2 Limite de liquidez

O ensaio para determinar o Limite de Liquidez dos solos foi de acordo com a norma DAER/RS-EL 004/01 - Determinação do Limite de Liquidez de solos. Para a garantia de qualidade do ensaio, o aparelho de Casagrande foi calibrado com a distância de 10mm entre o ponto de contato da concha com a base do aparelho.

A amostra de material foi obtida pelo quarteamento de acordo com a norma DAER/RS-EL 001/01, mediante 100g de solo passante na peneira nº40 (0,42mm). A amostra foi colocada numa cápsula de porcelana, na qual foi acrescentado 15ml de água destilada até a mistura ficar uma massa homogênea. Foram feitas adições na ordem de 2ml de água até a massa atingir uma consistência pastosa. Em seguida a mistura foi colocada na concha do aparelho de Casagrande e moldada com a ajuda de uma espátula até atingir a espessura de 10mm, sendo o excesso de material recolocado na cápsula. Logo após foi feita uma ranhura com um cinzel na área central da concha para dividir a massa em duas partes (Figura 23). A manivela do aparelho foi girada 2 vezes por segundo até que a ranhura na parte inferior se fechasse na extensão de 13mm, o que era esperado que ocorresse no intervalo entre 15 a 35 golpes. Após o fechamento da ranhura especificada seria tirada uma amostra de material para determinação de umidade (Equação 1), e o restante do material da concha seria transferido para a cápsula. Toda operação seria repetida 4 vezes, com acréscimo de mais material e água para haver condições mais fluidas para montar um gráfico semi-logaritmico, no qual é traçada uma reta sobre os pontos determinados pelo ensaio, sendo o Limite de Liquidez determinado pelo ponto de teor de umidade correspondente à interseção da reta com a abscissa de 25 golpes.

Figura 23 - Solo com a ranhura no aparelho de Casagrande.



Fonte: Autor (2023).

3.3.3 Limite de plasticidade e índice de plasticidade de solos

O ensaio para a obtenção do Limite de Plasticidade foi feito de acordo com a norma DAER/RS-EL 005/01 - Determinação do Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade de solos. Foi colhido 25g de solo passante na peneira n°40 (0,42mm), colocado numa cápsula de porcelana e misturado com água até que a massa ficasse com uma consistência plástica de modo que se pudesse moldar em forma de bola (Figura 24). Foi usado 8g deste material e comprimido até se obter uma massa de forma elíptica. Essa massa foi rolada na superfície da placa de vidro com uma certa

pressão da palma da mão para formar um filete cilíndrico de diâmetro uniforme em toda extensão. O filete começou a se fragmentar antes de alcançar 3mm de diâmetro, de modo que o solo foi devolvido à cápsula com adição de um pouco de água e reiniciado o procedimento. Se fosse atingido o diâmetro de 3mm e 100mm de comprimento, o filete seria comparado com um cilindro padrão e quebrado em 6 pedaços, amassados até obter forma elipsoidal. No entanto, o material sofreu fragmentação antes de atingir 3mm de diâmetro, o que impediu a conclusão do ensaio.

Figura 24 - Solo em formato esférico.



Fonte: Autor (2023).

3.3.4 Equivalente de areia

O ensaio foi baseado na norma DAER/RS- EL 006/01 - Determinação do equivalente de areia. A amostra deve pesar 1500g de material passado na peneira nº4 (4,76mm) e seco na estufa à temperatura de 105°C e 110°C. Após preencher o recipiente completamente e rasar a sua superfície, é anotado o peso do material no recipiente e tomada uma quantidade quatro vezes maior que o peso registrado. Quartear novamente para obter outras quatro amostras, sendo que duas serão

reensaiadas e duas guardadas para uma futura verificação. O material deve ser ensaiado numa temperatura de 20°C e 25°C.

Para fazer a solução concentrada é dissolvido 479g de cloreto de cálcio anidro em 2 litros de água destilada. Depois de a solução ser filtrada, é adicionada 2.167g de glicerina U.S.P. e 50g de formol. Após misturar bem, é adicionada água até completar 4 litros de solução. Já para a Solução de Trabalho são acrescentados 93ml da solução concentrada em outros 4 litros de água.

Para o ensaio é sifonada 10cm de solução de trabalho numa proveta e transferida para a mesma uma das amostras através de um funil. Após tampar a proveta, bater no fundo com a palma da mão para remover bolhas de ar e deixar em repouso por 10 minutos. Após tampar a proveta, agitar o material do fundo. Fazer 90 ciclos em aproximadamente 30 segundos. Deixar a proveta na posição vertical e lavar as paredes com o tubo lavador. Aplicar a percussão e torção, enchendo a proveta até os 38cm. Deixar o conteúdo em repouso por 20 minutos e começar a contagem do tempo logo após a retirada do tubo lavador. No final da sedimentação de 20 minutos, fazer a leitura do nível da parte da suspensão de argila e anotar a “leitura da argila”. Colocar o conjunto da sapata de peso sobre a proveta até que ela repouse na areia. Enquanto a sapata for baixada, manter um dos parafusos de centragem em contato com a parede da proveta. Assim que a sapata repousar, fazer a leitura do nível do parafuso de centragem como “leitura de areia”. O equivalente de areia será a média dos resultados obtidos entre as duas amostras ensaiadas. No caso de os ensaios apresentarem valores com diferença superior de 2%, deveria ser repetido o ensaio. Para determinar o equivalente de areia é utilizada a equação 3 abaixo:

$$EA = \frac{\textit{leitura da areia}}{\textit{leitura da argila}} \times 100 \quad (3)$$

3.3.5 Determinação da abrasão Los Angeles de agregados

O ensaio de Abrasão Los Angeles determina a resistência de agregado gráudo ao desgaste por abrasão num cilindro rotativo, contendo esferas metálicas. O desgaste é definido pela porcentagem em peso de material passante pela peneira n°12 (1,70mm) após o ensaio. O ensaio é realizado conforme a norma DAER/RS-EL 103/01.

A amostra para o ensaio é definida pela faixa granulométrica do material (Tabela 13), além do número de rotações. Já a carga abrasiva conforme a Tabela 14.

Tabela 13 - Faixas Granulométricas.

PENEIRAS		AMOSTRA - PESO PARCIAL EM GRAMAS			
PASSANDO	RETIDO	FAIXA A	FAIXA B	FAIXA C	FAIXA D
3"	2 1/2'	-	-	-	-
2 1/2'	2"	-	-	-	-
2"	1 1/2'	-	-	-	-
1 1/2'	1"	1250±25	-	-	-
1"	3/4"	1250±25	-	-	-
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10	-	-
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10	-	-
3/8"	1/4"	-	-	2500±10	-
1/4"	n°4	-	-	2500±10	-
n°4	N°10	-	-	-	2500±10
PESO TOTAL DA AMOSTRA EM g		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
N° DE ROTAÇÕES DO TAMBOR		500	500	500	500

Fonte: DAER, 2001.

Tabela 14 - Carga Abrasiva.

FAIXA	NÚMERO DE ESFÉRAS	PESO TOTAL DAS ESFERAS EM g
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15

Fonte: DAER, 2001.

A amostra deve ser lavada, seca numa estufa a uma temperatura de 105°C. As esferas e a amostra são colocadas na máquina "Los Angeles" para receberem as rotações a uma velocidade de 30rpm. Após o ciclo de rotações o material é retirado da máquina, peneirado e lavado na peneira n°12 (1,70mm). O material passante é rejeitado, enquanto o retido é novamente levado a estufa para obtenção do "peso da amostra após o ensaio" (m_x). O cálculo para a abrasão Los Angeles é de acordo com a Equação 4.

$$A_x = \frac{M_x - m_x}{M_x} \times 100 \quad (4)$$

A_x = abrasão “Los Angeles” com aproximação de 1%;

x = graduação (A, B, C, D) escolhida para o ensaio;

M_x = peso total da amostra seca antes do ensaio;

m_x = peso da amostra lavada e seca após o ensaio.

3.3.6 Determinação da sanidade de agregados pelo uso de sulfato de sódio

O ensaio determina a sanidade de agregados, analisando a sua resistência à desintegração pela ação da solução de sulfato de sódio (DAER/RS-EL 104/01). Para a preparação da solução de sulfato de sódio é colocado 350g de sal anidro (Na_2SO_4) para cada litro de água, e a solução é levada numa sala à temperatura de 21°C por 48 horas. A quantidade de cada fração de amostra obtida para o ensaio foi conforme as colunas A, B e C da Tabela 15. São acopladas as peneiras n°4 (4,76mm) e a de n°100 (0,149mm) nas quais todo material foi lavado, após levado a estufa a 105°C.

Tabela 15 - Elementos para o ensaio e sanidade.

	Peneiras		Quantidade aproximada de material (g)	Peneira para a determinação da perda	Fator de ponderação (% retida)
	Passando	Retido			
	A	B			
AGREGADO GRAUÍDO	2" (50,8mm)	1 1/2" (38,1mm)	3000	3/4" (19,1mm)	-
	1 1/2" (38,1mm)	1" (25,4mm)	1500	1/2" (12,7mm)	14
	1" (25,4mm)	3/4" (19,1mm)	1000	3/8" (9,52mm)	13
	3/4" (19,1mm)	1/2" (12,7mm)	750	1/4" (6,35mm)	20
	1/2" (12,7mm)	3/8" (9,52mm)	500	n°4 (4,76mm)	15
	3/8" (9,52mm)	n°4 (4,76mm)	300	n°8 (2,38mm)	38
AGREGADO MIÚDO	n°4 (4,76mm)	n°8 (2,38mm)	100	n°16 (1,19mm)	22
	n°8 (2,38mm)	n°16 (1,19mm)	100	n°30 (0,59mm)	19
	n°16 (1,19mm)	n°30 (0,59mm)	100	n°50 (0,297mm)	24
	n°30 (0,59mm)	n°50 (0,297mm)	100	n°100 (0,149mm)	20
	n°50 (0,297mm)	n°100 (0,149mm)	100	n°200 (0,074mm)	10
	n°100 (0,149mm)	n°200 (0,074mm)	-	-	5

Fonte: DAER, 2001.

Cada fração de amostra é colocada em uma tigela esmaltada, na qual foi adicionada a solução de sulfato de sódio até que tenha ficado coberta com 1cm. Todas tigelas são deixadas ao ar condicionado a 21°C por 18 horas. Após o período de imersão, a solução é derramada das tigelas e o procedimento é repetido por mais 4 ciclos. Após os ciclos completos cada amostra é lavada com água quente nas peneiras indicadas da coluna D da Tabela 15 e levadas a estufa a 105°C. Após o esfriamento cada amostra é novamente peneirada para obtenção da perda de peso. A porcentagem da perda parcial é obtida através da divisão da perda de peso pelo peso inicial. Já a porcentagem de perda ponderada é obtida pela multiplicação da porcentagem retida (coluna E da Tabela 15) com a porcentagem de perda parcial. São feitas as médias das perdas das amostras de agregados graúdos e miúdos para obtenção da perda média final pela Equação 5.

$$\text{Perda Média Final} = \text{"perda média agregado graúdo"} \times 0,55 + \text{"perda média agregado miúdo"} \times 0,45 \quad (5)$$

3.3.7 Compactação e CBR

3.3.7.1 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação (DAER/RS-EL 008/01) teve a finalidade de determinar a relação entre o teor de umidade do material e sua massa específica aparente seca. A amostra utilizada no ensaio foi obtida pelo quarteamento em consonância com a norma DAER/RS-EL 001/01, e a calibração e aferição dos equipamentos conforme a norma DAER/RS-EL 502/99.

Foram utilizados 5 moldes cilíndricos com volume de 2,085cm³, 5 colares metálicos com altura de 50,8mm e diâmetro de 152,4mm. Outrossim, foi incorporado um prato-base, além de um soquete grande com 50,8mm de diâmetro e 4,536kg de massa. Outros componentes necessários foram um disco espaçador, balanças com capacidades de 1kg e 20kg, sensíveis a 0,01g e 1g, uma estufa, cápsulas de alumínio, uma espátula, pinça de metal, proveta graduada com volume de 1000 ml, concha de metal, régua, bandeja em formato de circular e, finalmente, um pincel para anotações no molde (DAER, 2001).

Os ensaios foram feitos sem o reuso do material. Para cada ensaio foi coletado 6 kg de material que passou na peneira 3/4" (19,1mm) e pesado numa balança sensível a 1g. O material da primeira amostra foi colocado na bandeja com adição de 180ml de água (3%), a ponto de atingir um teor de umidade tal que, pressionando na mão uma porção de solo, a mesma mantivesse a sua forma após retirada da mão. Após a total homogeneização o material ficou pronto para o ensaio (DAER, 2001).

Foram anotados os números, os pesos e os volumes de cada molde. O cilindro foi fixado às hastes do prato-base e o disco espaçador foi inserido no conjunto. Após, foi ajustado o colar sobre o cilindro e fixado às hastes do prato-base. Foi colocada uma folha de papel com um raio igual à área da base desse cilindro, para diminuir a aderência do solo compactado ao metal do disco (DAER, 2001). As energias de compactação dos valores necessários foram pautadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros para o ensaio de compactação

CILINDRO	SOQUETE	ALTURA DE QUEDA	AASHO T 99-57 (AASHO NORMAL)	PROCTOR INTERMEDIÁRIO	AASHO T 180-57 (AASHO MODIFICADO)
grande	grande (4.536g)	457,2mm	5 camadas x 12 golpes	5 camadas x 26 golpes	5 camadas x 56 golpes
grande	pequeno (2.495g)	304,8mm	3 camadas x 56 golpes	-	-

Fonte: DAER (2001).

As amostras foram submetidas a golpeamento em consonância com a compactação necessária para a respectiva energia. Cada uma das 5 camadas sofreu 26 golpes na energia intermediária e 56 golpes na energia modificada. Entre uma camada e outra compactada foi feita uma leve escarificação na camada subjacente. Tais golpes foram realizados com uma altura de queda de 457,2mm com o soquete grande de 4,536kg sobre a camada superior (Figura 25). Posteriormente à compactação, o molde foi levado até uma bandeja e, com o auxílio da espátula, foi desprendido o solo que estava aderido no colar. Uma vez removido o colar, o solo compactado foi aparado com o auxílio de uma régua para ficar nivelado e obter o seu peso final.

Figura 25 - Compactação do solo no cilindro.



Fonte: Autor (2023).

Do material restante na bandeja, foi tomada uma porção na média de 200g a fim de determinar a umidade (Equação 1). Todo processo foi realizado para as outras 4 amostras, em uma ordem crescente de 2 pontos percentuais em relação ao teor de umidade anterior, sendo 5%, 7%, 9% e 11% (DAER, 2001).

Os cálculos realizados no ensaio de compactação foram os seguintes: Do peso total foi subtraído o peso do cilindro para obter o peso da amostra compactada. Esse valor foi dividido pelo volume (cm³) do molde cilíndrico, sendo contabilizado como a “densidade do solo úmido”. Finalmente, foi calculado para cada teor de umidade o peso específico aparente seco, por meio da Equação 6.

$$\gamma_s = \text{densidade do solo úmido} \times \frac{100}{100+h} \times g \quad (6)$$

Onde:

γ_s = massa específica aparente seca (“densidade do solo seco”);

h= teor de umidade;

g= aceleração da gravidade da Terra (9,81m/s²).

Foi plotada a curva de compactação, sendo o peso específico aparente seco inserido no eixo y desse gráfico e os teores de umidade no eixo x. Além disso, o peso específico aparente seco máximo do solo foi determinado pelo maior valor de y. A umidade ótima corresponde ao maior teor observado na curva de compactação.

3.3.7.2 Ensaio de CBR

Os mesmos corpos de prova obtidos no ensaio de compactação foram utilizados para o ensaio de ISC/CBR (DAER/RS-EL 009/01). Para tal, inicialmente, foi inserido o papel filtro acima do prato de base e invertido o molde com o solo já compactado e fixado às hastes do prato-base. Acima da amostra compactada, foram dispostos dois discos para inserir sobrecarga a fim de simular o peso do pavimento, cada um deles com o peso de 2,270kg. Ademais, a norma determina que o peso total da amostra não pode ultrapassar 4.540g com uma margem de erro de 20g para mais ou para menos (DAER, 2001).

Os moldes e os pesos foram mergulhados num tanque com água, até que ficassem totalmente cobertos pelo líquido. O tripé foi apoiado em conjunto ao extensômetro, na região do colar (Figura 26). Essa foi a primeira leitura para determinação da expansão do solo. A amostra ficou submersa por um período de 4 dias. Após esse tempo, foi anotado o valor da expansão final do solo. Em seguida, foram retirados a sobrecarga e o colar do molde para retirar o prato-base da imersão, removendo a água livre. Após apoiado durante 15 minutos sob os pesos da sobrecarga, o conjunto foi removido para escoamento da água. Posteriormente, foi inserido em cima da amostra um papel filtro e retornados os pesos anteriormente utilizados. Esses componentes foram inseridos na prensa, assentando o pistão de penetração. Os extensômetros do pistão foram zerados, assim como os do anel dinamométrico. Foi aplicada sobre o pistão uma carga com uma frequência de 1,27mm por minuto e anotados os valores do extensômetro do anel dinamométrico (Figura 27). Foram obedecidas as frequências necessárias para avaliar a penetração do solo ou seja, 0,63; 1,27; 1,90; 2,54; 3,81; 5,08; 7,62; 10,16 e 12,70 mm, para anotação na “leitura defletômetro”. A “pressão calculada” foi obtida pela relação entre a leitura do extensômetro e a constante do anel (DAER, 2001).

Figura 26 - Corpos de prova submersos no tanque de água.



Fonte: Autor (2023).

Figura 27 - Corpo de Prova sendo rompido na prensa CBR.



Fonte: Autor (2023).

Para que a expansão do sistema fosse quantificada, foi subtraído da leitura final o valor inicial do extensômetro. A partir disso, a expansão foi calculada pela Equação 7.

$$\text{Expansão}(\%) = \frac{(\text{leitura final} - \text{leitura inicial no extensômetro})(\text{em mm})}{\text{altura inicial do corpo de prova (em mm)}} \times 100 \quad (7)$$

A curva de penetração relaciona a pressão calculada (eixo y) com as penetrações (eixo x). Deste modo, foi desenhada uma curva por meio dos valores obtidos, que poderia ter três possibilidades:

A – Não exige correção e a pressão corrigida é igual a calculada.

B – O zero dessa função deve ser corrigido da seguinte forma: (2,54+b) mm e (5,08+b).

C – Traçar a inflexão da curva por meio da tangente até atingir o eixo das abscissas. A correção será efetuada com os valores: (2,54+c) mm e (5,08+c).

Finalmente, foi calculado o Índice de Suporte Califórnia ou ISC, por meio da Equação 8.

$$\text{ISC}(\text{deslocamento}) = \frac{\text{pressão corrigida p/ penetração}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

Para o deslocamento de 2,54mm foi usada a pressão 70,3kg/cm² e para o deslocamento de 5,08mm foi usada a pressão de 105,4kg/cm². Para finalizar este ensaio, foi traçado o gráfico de “umidade x ISC”, plotado no mesmo local da curva de compactação (DAER, 2001). O ponto equivalente à umidade ótima define o CBR do material.

3.3.8 Ensaio de compactação Mini-MCV e de perda de massa por imersão

O Mini-MCV é um ensaio de compactação importante para a diminuição dos vazios em um solo, com o objetivo de aumentar sua massa específica. O método é compatível com grãos finos, ou seja, menores que 2mm, que são submetidos a esforços de compactação por golpes para que o corpo de prova atinja sua máxima

massa específica. Durante o processo de golpes deverá ser medida a variação da altura (VILLIBOR E ALVES, 2019).

Foi utilizada a série simplificada de Nogami e Villibor, sendo aplicada uma quantidade de golpes necessários para atingir a curva de deformação no teor de umidade correspondente ao Mini-MCV igual a 10. Já o afundamento (Δa_n) consiste na variação de altura do CP no processo de compactação, que foi calculado conforme a Equação 9.

$$\text{Simplificada: } \Delta a_n = A_n - A_F \quad (9)$$

Onde:

A_n = Altura do CP após n golpes (mm);

A_F = Altura final do CP (mm).

Foi definida a curva de deformabilidade, na qual as diminuições de alturas dos CPs foram representadas no eixo y (ordenadas), enquanto o número de golpes (n) aplicados foram representados no eixo x (abscissas), em escala logarítmica, ou seja $10 \log(n)$. Para o cálculo do Mini-MCV foi usada a Equação 10, sendo que n foi a projeção no eixo x da intersecção de cada curva de deformação com a linha horizontal da altura ($\Delta a_n = 2\text{mm}$). Para cada teor de umidade de compactação houve um Mini-MCV.

$$\text{Mini - MCV} = 10 \times \log(n) \quad (10)$$

Onde:

n: Número de golpes do soquete.

O coeficiente c' determina a parte retilínea que existe na curva de deformação de cada CP conforme o teor de umidade da sua compactação. Para a classificação, usou-se um c'_n no qual $n=10$. Para obtenção da curva de deformabilidade foi utilizada a interpolação gráfica conforme a Equação 11.

$$c' = \frac{\Delta(\Delta a_n)}{\Delta \text{Mini-MCV}} \quad (11)$$

Onde:

Δa_n : Afundamento (mm);

Mini-MCV: Valor do Mini-MCV no mesmo intervalo considerado para $\Delta(\Delta a_n)$;

c' : Coeficiente de argilosidade do CP, obtida no trecho retilíneo da curva de deformabilidade.

A curva de variação do Mini-MCV com a umidade de compactação segue uma forma geral (retilínea, côncava e convexa), que indica o eventual comportamento laterítico do solo (côncava). A curva de variação final do CP permite distinguir os solos de densidade alta (altura final do CP menor que 48mm) dos de densidade baixa, distinção essa necessária para determinar a perda de massa por imersão.

A curva de compactação representa, em abscissas, os teores de umidade de compactação (h_c) e, em ordenadas, a massa específica aparente seca (MEAS). A partir da curva de compactação, obteve-se a massa específica aparente seca máxima (MEAS_{máx}), a umidade ótima (h_o), o coeficiente d' e a máxima MEAS para cada teor de umidade. Esses valores foram expressos nas Equações 12, 13 e 14. O coeficiente d' vem a ser a resultante da divisão entre a variação da MEAS pelo teor umidade do solo (h_c) para 10 golpes na série simplificada conforme a Equação 15.

$$h_c = \frac{M_a \times 100}{M_s} \quad (12)$$

Onde:

h_c : Teor de umidade de compactação (%);

M_a : Massa de água contida no solo (g);

M_s : Massa de solo seco (g);

$$MEAS = \frac{M_{SC}}{V_{CP}} \quad (13)$$

Onde:

MEAS: Massa específica aparente seca do solo (g/cm³);

M_{SC} : Massa de solo seco compactado (g);

V_{CP} : v =Volume de CP (cm³).

$$M_{sc} = \frac{M_{hc}}{1 + \frac{hc}{100}} \quad (14)$$

Onde:

M_{sc} : Massa de solo seco compactado (g);

M_{hc} : Massa de solo úmido compactado (g);

hc: Teor de umidade do solo (%).

$$d' = \frac{\Delta MEAS_n}{\Delta h_c} \quad (15)$$

Onde:

$\Delta MEAS_n$: Variação da massa específica aparente seca do solo após n golpes (kg/m³);

Δh_c : Variação do teor de umidade do solo (%).

Neste ensaio foram utilizados um soquete leve de 2,270kg (altura de queda de 305mm), suporte de extensômetro, extensômetro, molde cilíndrico com 50mm de diâmetro, base do soquete com 49,7mm, CP maciço cilíndrico com raio de 49,8 mm, discos de polietileno e anéis de vedação (diâmetro de 50 mm) e suporte espaçador bipartido, com altura de 50mm (VILLIBOR E ALVES, 2019). O ensaio consiste na preparação das amostras úmidas, separadas em 5 partes de 300g, cuja compactação foi efetuada na altura determinada. Assim se definiram a curva de deformabilidade, coeficiente c' e o coeficiente d' .

Para a obtenção da amostra, foram separadas 1500g do material peneirado (peneira de 2mm). A amostra foi dividida em 5 partes de solo com 300g cada dentro de cápsulas de alumínio e colocadas em estufa a 105°C por 24 horas para secar. Cada porção de solo seco foi umedecida com dois pontos de teor de umidade acima e dois pontos abaixo da umidade ótima. Os moldes tiveram de ser lubrificados internamente com óleo vegetal para evitar que o solo ficasse retido nas paredes do molde. Foram coletados cerca de 100g de cada amostra de solo para obtenção do teor de umidade conforme Equação 1.

Uma vez introduzidos no aparelho o cilindro, o CP maciço, o papel filtro e o soquete, foi feita a leitura do extensômetro para calibração. A aferição do aparelho de compactação foi realizada, por meio da Equação 16.

$$k_a = A_c + L_a \quad (16)$$

Onde:

k_a : Constante de aferição (mm);

A_c : Altura do CP cilíndrico padrão (mm);

L_a : Leitura do extensômetro para calibração.

Após a leitura do extensômetro foi retirado o CP maciço do aparelho e inserido 200g do solo no cilindro para iniciar a compactação (Figura 28). Assim foram iniciados os golpes de forma progressiva, sendo interrompidos apenas quando ocorresse uma variação de altura menor do que 0,1mm para cada 10 golpes ou 0,2 mm para cada 20 golpes, ou em caso de exsudação da água acima e abaixo do CP. A altura final do CP foi obtida por meio da Equação 17.

$$A_n = K_a + L_{en} \quad (17)$$

Onde:

A_n : Altura final do CP após n de golpes (mm);

K_a : Constante de aferição;

L_{en} : Leitura do extensômetro após n golpes (mm).

Figura 28 - Corpo de Prova no aparelho Mini-MCV.



Fonte: Autor (2023).

Já o Coeficiente de Perda de Massa por Imersão (Pi) expressou a porcentagem de massa seca que soltou do CP imerso em relação à parte extrudada da amostra de solo compactada. O coeficiente Pi foi calculado pela Equação 18.

$$Pi = 100 \times \frac{M_i \times L_{cp}}{M_s \times L_{ex}} \times F_c \quad (18)$$

Onde:

Pi: Coeficiente de perda de massa por imersão (%);

M_i : Massa seca desprendida, após a imersão do CP (g);

M_s : Massa seca do CP, logo após sua compactação (mm);

L_{cp} : Altura do CP, logo após sua compactação (mm);

L_{ex} : Altura da parte extrudada do CP ($L_{ex} = 10$ mm);

F_c : Fator de correção do Pi ($F_c = 1,0$: desprendimento normal e $F_c = 0,5$: desprendimento em monobloco).

A aparelhagem para o ensaio consiste em um cilindro de 50mm de diâmetro e altura de 130mm, tanque de imersão, água, parte do CP e uma cápsula para a captura do solo desprendido (VILLIBOR E ALVES, 2019). O procedimento foi efetuado posteriormente ao Mini-MCV com a extrusão de 10mm do CP. Logo após, os CPs foram imersos por 20 horas para determinação da massa seca desprendida (Figura 29). O material desprendido foi levado a estufa para determinação da massa e cálculo do coeficiente Pi.

Figura 29 - Corpos de Prova submersos no tanque.



Fonte: Autor (2023).

Para a determinação do valor de Perda de Massa por imersão (P_i) para fins classificatórios, plotou-se um gráfico com valores de Mini-MCV, em abscissa, e valores de P_i em ordenadas. O parâmetro P_i é determinado pelo critério da altura final do corpo de prova (A_f). Quando a A_f for menor que 48mm o Mini-MCV será igual a 15, que o caracteriza como solo de alta densidade. No entanto, se a A_f for maior que 48mm, o Mini-MCV adotado será igual a 10, sendo um solo de baixa densidade.

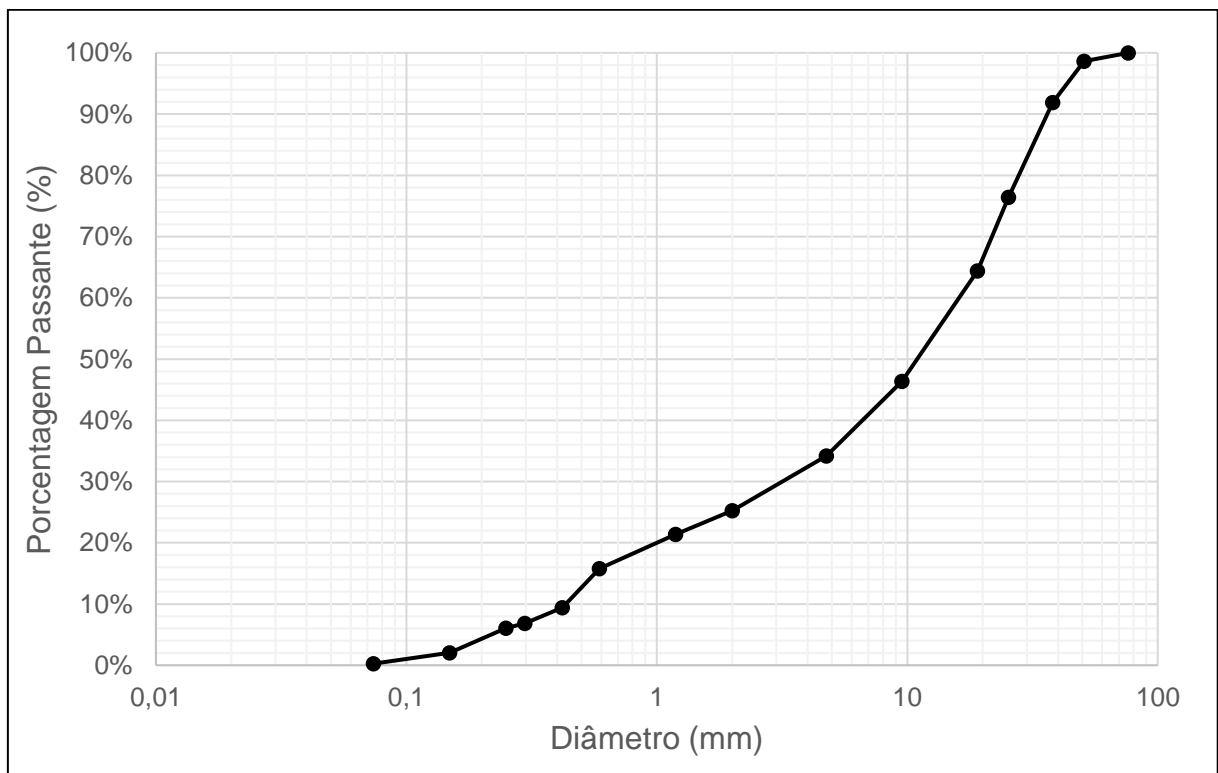
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Ensaio de Laboratório

4.1.1 Ensaio de Caracterização

Na Figura 30 é apresentada a curva granulométrica. Na Tabela 17 são apresentados os resultados de caracterização com as correspondentes classificações tradicionais, Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Figura 30 - Curva Granulométrica



Fonte: Autor (2023).

Tabela 17 - Características geotécnicas do solo estudado.

Propriedades		Valores/Descrição
Granulometria	Pedregulho (2mm <math><\Phi \leq 60\text{mm}</math>)	75%
	Areia (0,06mm <math><\Phi \leq 2\text{mm}</math>)	25%
	Classificação granulométrica segundo a NBR 6502:1995	Pedregulho arenoso
Plasticidade	Limite de Liquidez - LL	NL
	Limite de Plasticidade - LP	NP
	Índice de Plasticidade - IP	NL/NP
	Classificação segundo Burmister (1949) <i>apud</i> Das e Sobhan (2014)	Sem Plasticidade
Classificação SUCS		GW Pedregulho bem Graduado
Classificação da AASHTO		A-1-a Pedregulho bem Graduado
Índice de Grupo		0

Fonte: Autor (2023).

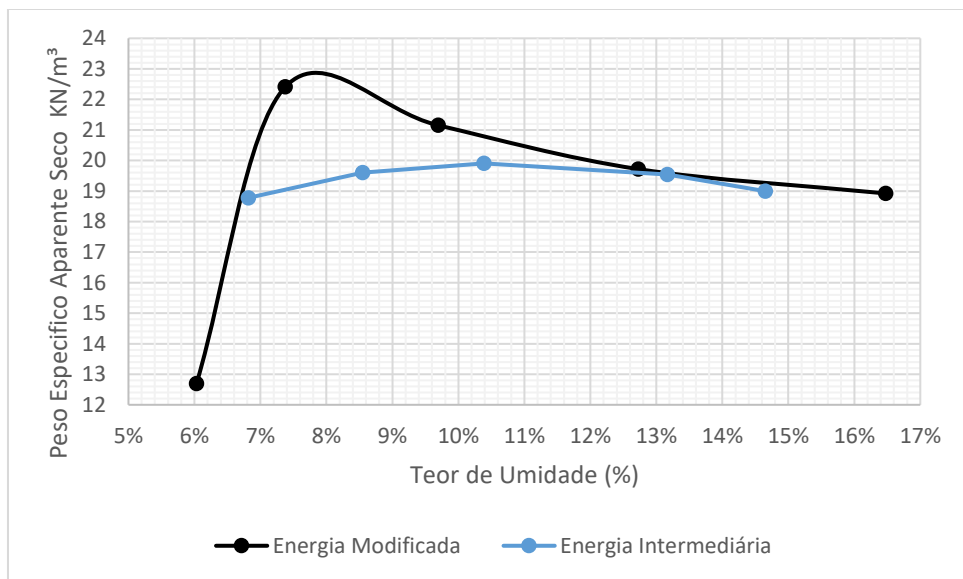
Na classificação da SUCS, como a porcentagem passante na peneira n°200 foi menor que 5%, o Coeficiente de Não Uniformidade (CNU) apresentou o valor de 37 e o Coeficiente de Curvatura resultou em 1,31, classificando o solo como Pedregulho bem graduado. Pelo método da AASTHO o material ficou no grupo A-1-a, também o classificado como Pedregulho bem graduado. Como o material é bem graduado, ele dá um indicativo preliminar de ser apropriado para o uso.

As classificações geotécnicas tradicionais convergem com a classificação granulométrica. Isso ocorre, pois o material não tem finos e não tem plasticidade, não dependendo, portanto, dos limites de Atterberg para ser classificado, mas somente da granulometria por peneiramento.

4.1.2 Ensaios de Compactação e ISC

Na Figura 31 estão representadas as curvas de compactação e na Tabela 18 os valores dos pesos específicos na umidade ótima nas energias intermediárias e modificadas. Considerando um ponto abaixo e um ponto acima da umidade ótima, o peso específico tem uma queda de 0,5% na compactação da energia Intermediária. Na energia modificada, um ponto abaixo da umidade ótima, o peso específico tem uma queda de 15,3% e, um ponto acima, o peso específico cai em 3,93%. Isso significa que a margem de tolerância de desvio de umidade no projeto e na execução das camadas, particularmente na energia modificada deve ser limitada a valores baixos, com o rigoroso controle tecnológico de execução.

Figura 31 - Curva de Compactação



Fonte: Autor (2023).

Tabela 18 - Compactação.

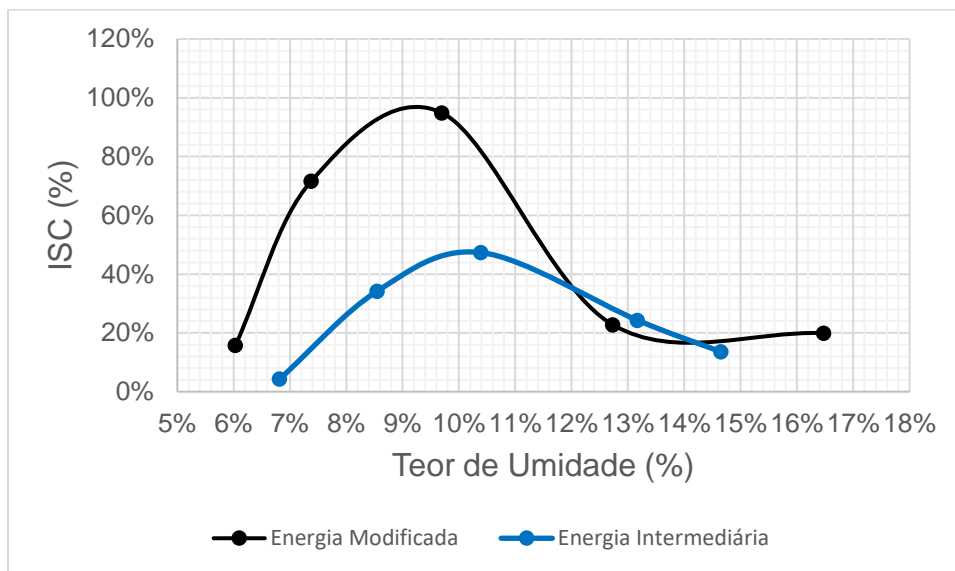
Energia	Intermediária	Modificada
Umidade Ótima (%)	10,4	7,8
Peso Específico Aparente Seco (KN/m³)	19,9	22,9

Fonte: Autor (2023).

Observa-se que, de maneira coerente, na energia intermediária a umidade é mais elevada e o peso específico aparente seco menor, enquanto na energia modificada a umidade é mais baixa e o peso específico mais alto. Além disso, os valores encontrados se situam dentro da ordem de grandeza dos valores típicos dos pedregulhos apresentados em Pinto (2006).

Na Figura 32 estão representadas as curvas de ISC e, na Tabela 19, estão os valores dos ISC e Expansão, ambas nas energias intermediárias e modificadas. Considerando um ponto abaixo da umidade ótima, na energia Intermediária, o CBR diminui 6,38%, enquanto, um ponto acima, o ISC cai 12,77%. Na energia modificada, um ponto abaixo da umidade ótima, o ISC diminui 35% e, um ponto acima, o ISC aumenta em 18,75%. Isso reforça ainda mais a necessidade de controle de desvio de umidade, tanto a nível de projeto e de execução, em especial quando se usa a energia modificada.

Figura 32 - Curva de ISC



Fonte: Autor (2023).

Tabela 19 - ISC e Expansão

Energia	Intermediária	Modificada
ISC Máximo (%)	48	97
ISC Umidade Ótima (%)	47	80
Expansão Umidade Ótima (%)	0	0

Fonte: Autor (2023).

Os dados do gráfico mostram que o valor máximo do ISC ocorre após a umidade ótima, ou seja, no ramo úmido. O valor do ISC obtido na energia modificada quase dobra de valor em comparação o valor na energia intermediária.

De acordo o DAER (1998), o ISC exigido para a sub-base da Classe 1 é de 30% e para base da Classe B é de no mínimo 80%. Para o DNIT (2010) o material para a sub-base deve possuir 20% e, para a base, entre 60% a 80%. De acordo com Villibor e Alves (2019), para sub-base, o material deve ser maior de 30% na Energia Intermediária e maior de 70% para a base.

Conforme o DAER (1998) e o DNIT (2010), a expansão máxima do material para a sub-base deve ser inferior a 1% e, para a base, menor que 0,5%. De acordo com Villibor e Alves (2019), para sub-base e base, o material deve ter a expansão menor de 0,3%, em ambas energias de compactação.

O material não apresentou expansão na umidade ótima, e nem em intervalos maiores. Os valores obtidos nos ensaios de ISC atenderam os valores exigidos pelas normas técnicas, dando um indicativo de que o material é apropriado no uso de pavimentação.

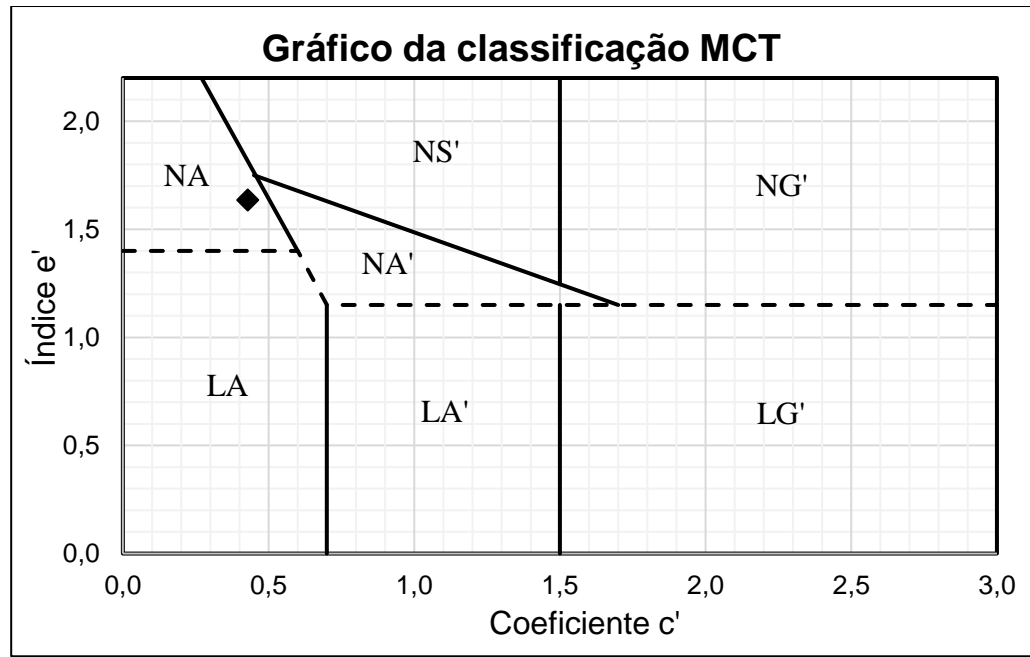
4.1.3 Classificação G-MCT

Na classificação MCT através dos ensaios de Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão foi obtida a curva de deformabilidade do solo, bem como os coeficientes c' , d' e e' , sendo que a fração fina do solo recaiu no grupo NA (Areia não Laterítica) conforme Figura 33, possuindo fraca coesão e baixa argilosidade.

Para a classificação G-MCT o tipo granulométrico define o solo através da Figura 34, no qual o solo ficou classificado como Ps-NA (Pedregulho com areia não laterítica) que se encontra na classe GN (Granular com finos de comportamento não laterítico).

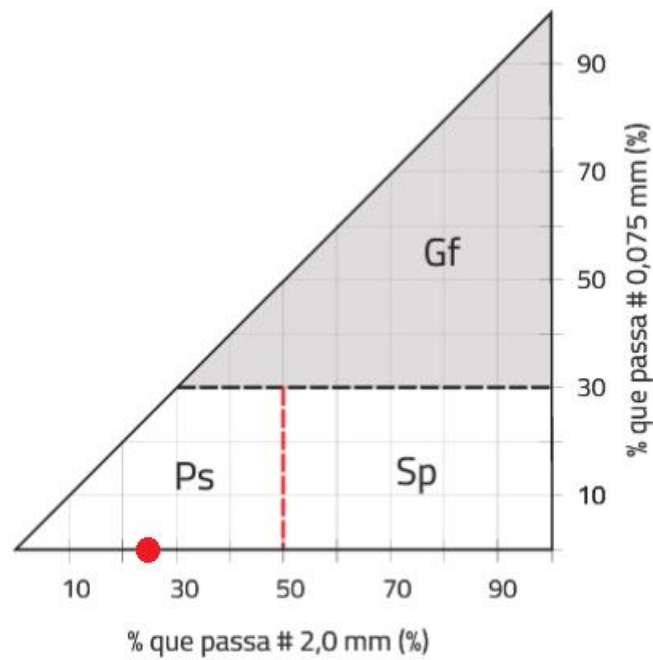
Dentro da classe GN, esse solo possui a segunda melhor opção no uso de base e sub-base, apenas perdendo a colocação para os grupos Ps-NA' e o Sp-NA'

Figura 33 - Gráfico da Classificação MCT



Fonte: Autor (2023).

Figura 34 - Classificação granulométrica G-MCT



Fonte: Autor (2023).

4.1.4 Abrasão e Durabilidade dos agregados

O resultado no ensaio de Abrasão Los Angeles foi de 21,78%, habilitando-o para no uso das camadas de sub-base e base de pavimentos. Conforme o DAER (1998), a resistência ao desgaste dos agregados exigida no ensaio de Abrasão á Los Angeles é de no máximo 40% para a base, enquanto o DNIT (2010) exige que o valor não ultrapasse os 55%. De acordo com Villibor e Alves (2019), o desgaste dos agregados para o uso na sub-base pode ser de até 70% e, para a base, o desgaste deve ser inferior a 50% para o material da faixa granulométrica 2, na qual melhor se enquadra o material em estudo.

O resultado no ensaio de Sanidade foi de 7,739%, o tornando apropriado no uso das camadas de sub-base e base de pavimentos. Conforme o DAER (1998) o valor no ensaio de Sanidade não pode ter perda superior a 12 % para a sub-base e de no máximo 10% para a base. De acordo com Villibor e Alves (2019), o valor da perda dos agregados para o uso na sub-base e para a base deve ser inferior a 20%.

4.1.5 Equivalente de Areia

O valor obtido no ensaio de equivalente de areia foi de 70,3% o que o torna favorável ao uso neste quesito. Conforme o DAER (1998) o valor no ensaio de equivalente de areia para a sub-base (Classe 1) precisa ser maior ou igual a 25% e, para a base o material (Classe B) a exigência é de 30%, mesmo valor exigido na base pelo DNIT (2010).

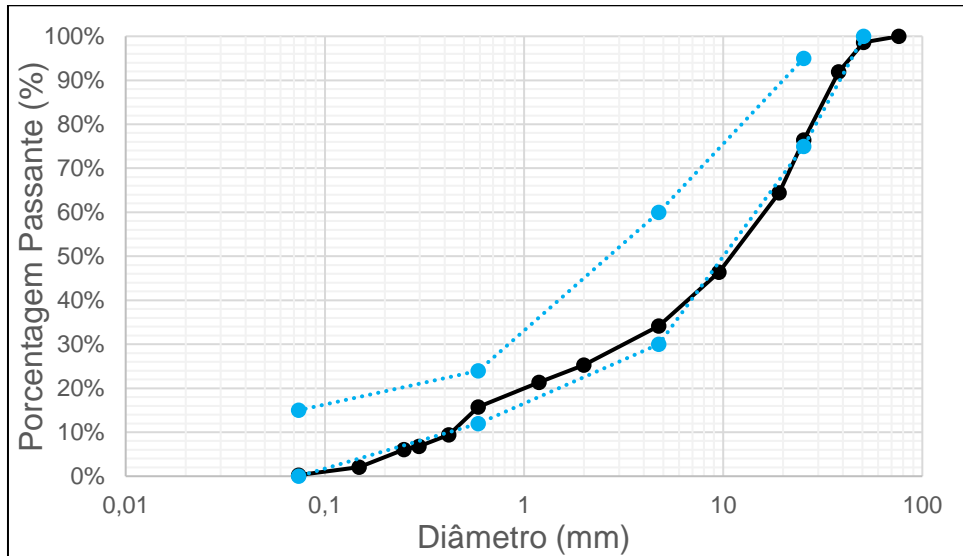
4.2 Aptidão do material estudado para o emprego em base e sub-base de pavimentos

4.2.1 Emprego do material em camadas de sub base de pavimentos

Na Figura 35 está representada a curva granulométrica com os limites das faixas granulométricas para a sub-base de acordo o DAER (1998). Para a curva granulométrica do material ficar totalmente dentro das faixas granulométricas da sub-

base da Classe 1, parte do material grosseiro deve ser eliminado e acrescentado filler para a curva se enquadrar totalmente dentro das faixas.

Figura 35 - Gráfico das Faixas Granulométricas para sub-base



Fonte: Autor (2023).

Os valores obtidos nos ensaios e as exigências do DAER, DNIT e Villibor e Alves para o uso de material na sub-base constam na Tabela 20. De acordo as exigências, os resultados foram satisfatórios em todos ensaios dando um indicativo que o material é apropriado para o uso nas camadas de sub-base. Porém há a necessidade de correção da curva granulométrica para atender a faixa do DAER.

Tabela 20 - Resultados e exigências para o uso na sub-base

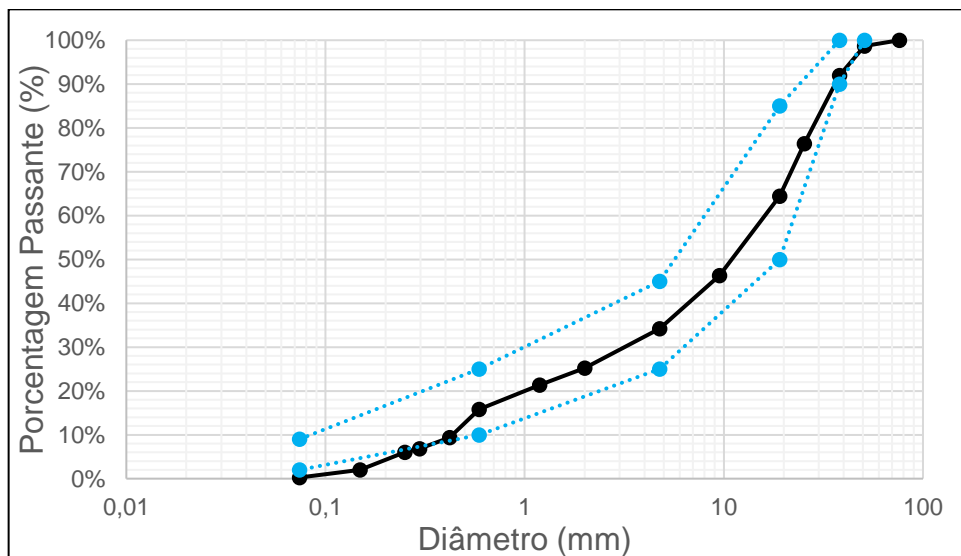
Requisitos	Valores Obtidos	Exigências		
		DAER	DNIT	Villibor e Alves
ISC (%)	47	≥30	≥20	> 30 (EI)
Expansão (%)	0	< 1	< 1	< 0,3 (EI)
Abrasão (%)	21,78	-	-	< 70
Sanidade (%)	7,739	< 12	-	< 20
Equivalente de Areia (%)	70,3	≥ 25	-	-
Classificação G-MCT	Ps-NA	-	-	2º Prioridade do grupo NL
Índice de Grupo	0	-	0	-

Fonte: Autor (2023).

4.2.2 Emprego do material em camadas de base de pavimentos

Na Figura 36 está representada a curva granulométrica com os limites das faixas granulométricas para a base de acordo o DAER (1998), a qual apresenta as faixas granulométricas muito parecidas com as do DNIT. Para a curva granulométrica do material ficar totalmente dentro das faixas granulométricas da base da Classe B, parte do material grosseiro deve ser eliminado e acrescentado filler para a curva se enquadrar totalmente dentro das faixas.

Figura 36 - Gráfico das Faixas Granulométricas para base



Fonte: Autor (2023).

Os valores obtidos nos ensaios e as exigências do DAER, DNIT e Villibor e Alves para o uso de material na base constam na Tabela 21. De acordo as exigências, os resultados foram satisfatórios em todos os ensaios, exceto o enquadramento na faixa granulométrica, dando um indicativo que o material é apropriado para o uso nas camadas de base.

Com a adição de cimento como filler, além de produzir o ajuste da curva, iria melhorar ainda mais a classificação G-MCT e o ISC do material. Neste trabalho não foi realizado, justamente porque pretendeu-se avaliar o material in natura até o final, para as 3 especificações. Realizando os ensaios novamente, eventualmente há chances de obter valores de ISCs para emprego na base, já na energia intermediária.

Tabela 21 - Resultados e exigências para o uso na base

Requisitos	Valores Obtidos	Exigências		
		DAER	DNIT	Villibor e Alves
ISC (%)	80	≥80	60 a 80	>70 (EM)
Expansão (%)	0	≤0,5	≤0,5	<0,3 (EM)
Abrasão (%)	21,78	<40	<55	<50
Sanidade (%)	7,739	<10	-	<20
Equivalente de Areia (%)	70,3	>30	>30	-
Classificação G-MCT	Ps-NA	-	-	2° Prioridade do grupo NL

Fonte: Autor (2023).

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que o seixo rolado estudado se constituiu num material promissor para o emprego em bases e sub-bases de pavimentos. A luz das especificações do DAER, DNIT carece apenas efetuar o ajuste granulométrico, com eliminação da porção mais grosseira e adição de fíler. Com bases nas prescrições de Villibor e Alves, a única restrição é de que o material seja inferior a 50mm.

Os Índice de Suporte Califórnia chegaram a valores muito bons e adequados ao uso em pavimentos. Com a adição de cimento como fíler, o material iria melhorar mais ainda mais outras propriedades. Com a realização de novos ensaios, há chances de obter valores de ISCs para o emprego na base, já na energia intermediária. Nos ensaios de compactação deve haver um rigoroso controle no teor de umidade, pois o material apresentou grande queda nos valores de ISC com a umidade a um ponto abaixo da umidade ótima. A granulometria registrou uma curva bem graduada, que poderia ser otimizada com retirada de algum material grosseiro em troca de material fino. A mesma substituição favoreceria o resultado do Mini-MCV e a Perda de Massa por Imersão. O solo foi classificado como Pedregulho Arenoso e, na classificação G-MCT, como Pedregulho com areia não laterítica (Ps-NA).

O material apresentou comportamento não líquido e não plástico, ou seja, não apresenta limites. Assim a resultante para estes dois ensaios apresentou-se convenientemente Sem Plasticidade, que está coerente para este tipo granulométrico, pois não há finos no material. Os ensaios de Equivalente de Areia, Abrasão Los Angeles e Sanidade, obtiveram resultados promissores para a finalidade proposta.

Como sugestão a trabalhos futuros, inclui-se duas opções de estudo:

- Fazer os ensaios com a curva granulométrica ajustada para atender as faixas do DAER e do DNIT.
- Fazer os ensaios com a inclusão de uma britagem primária do material.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D.M. & VILLIBOR, D.F. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo: Villibor, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *6502: Rochas e solos*. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- BALBO, José T. *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de textos, 2007.
- BERNUCCI ET.AL. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Petrôbras, 2022.
- BORGES, Ezequiel. *Ensaio do limite de liquidez e plasticidade*, 2015. Disponível em: <<https://www.tudoengcivil.com.br/2015/04/ensaio-de-limite-de-liquidez-e.html>>. Acesso em: 16 Março 2023.
- CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros. *Mecânica dos Solos e suas aplicações: fundamentos*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CNT. *Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada*, 2018. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada>>. Acesso em: 15 Março 2023.
- CNT. *Pesquisa CNT de rodovias 2022*. Brasília: CNT:SEST SENAT, 2022.
- DAS, Braja M. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. São Paulo: Cengage Learning, 2014. TRADUCAO DA 8ª EDICAO NORTE-AMERICANA.
- DAER. *Especificações gerais*. Rio Grande do Sul: Secretaria de Transportes, 1998.
- DAER. *Manual de ensaios*. Secretaria de transportes: Manual de normas e pesquisas. Vol 1. Rio grande do Sul, 2001.
- DAER. *Manual de ensaios*. Secretaria de transportes: Manual de normas e pesquisas. Vol 2. Rio grande do Sul, 2001.
- DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. de C. da; PAULA, T. L. F. de. *Manual de cartografia hidrogeológica*. Recife: CPRM, 2014b. 120 p. Programa de Cartografia Hidrogeológica. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm>>. Acesso em: 01 jun. 2023.
- DNER. *Agregados: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio*. Brasília: Ministério dos Transportes, 1994.
- DNIT. *Manual de Pavimentação*. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. *Pavimentação – Reforço do subleito -Especificação de serviço*. MT, 2010.

DNIT. *Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço*. MT, 2010.

PALIMANAN. *Seixo telado*, 2020. Disponível em:
<<https://www.palimanan.com.br/produto/seixo-telado/>>. Acesso em: 16 Março 2023.

PENA, R. F. A. *Laterita*. Disponível em:
<<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/laterizacao-dos-solos.htm>> Acesso em: 01 Novembro 2023.

PINNHEIRO, CLEANE D. S. D. S. *Extração de Areia e Seixo: Desenvolvimento ou degradação? o caso de Porto grande AP*. Macapá: UFPA, 2016.

PINTO, Carlos Sousa. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORTAL DO CONCRETO. *Agregados para concreto*, 2018. Disponível em:
<<https://www.portaldoconcreto.com.br/agregados>>. Acesso em: 16 Março 2023.

RIO GRANDE DO SUL. *DECRETO N° 52.701 de 11 de novembro de 2015*. Disponível em:
<<https://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/DEC%2052.701.pdf>> Acesso em: 14 Outubro 2023.

SITE ORIGINAL PEDRAS. *Solo Brita*. Disponível em:
<<https://www.originalpedras.com.br/solo-brita-faixa-granulometrica-500mm2-ate-0075mm-n200>> Acesso em: 12 Novembro 2023.

SITE PEDRAS OURO & PRATA. *Paralelepípedo*. Disponível em:
<<https://pedrasouroprata.com.br/pedra/paralelepipedo-ou-duquinho/>> Acesso em: 09 Outubro 2023.

SITE PEDREIRA BEIRA RIO. *Brita Graduada Simples*. Disponível em:
<<https://pedreirabeirario.com.br/produtos/brita-graduada-simples-bgs>> Acesso em: 11 Novembro 2023.

SITE PEDREIRA BEIRA RIO. *Bica Corrida*. Disponível em:
<<https://pedreirabeirario.com.br/produtos/bica-corrída>> Acesso em: 15 Novembro 2023.

SMITH ET.AL. *Desassoreamento de rios: quando o poder público ignora as causas, a biodiversidade e a ciência*, São Paulo, 2019.

VIANA, Hélio M. F. *Origem e formação dos solos*. [S.I.]: FTC, 2016.

VILLIBOR, Douglas F.; ALVES, Mariana L. *Pavimentação de baixo custo para regiões tropicais: projetos e construção: novas considerações*. Florianópolis: Tribo da Ilha, 2019.