

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO CESAR DE SOUZA SOWINSKI

**ANÁLISE DA MISTURA DE SOLO ARGILOSO DO MUNICÍPIO DE APUCARANA
E PÓ DE BRITA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

APUCARANA

2022

LEONARDO CESAR DE SOUZA SOWINSKI

**ANÁLISE DA MISTURA DE SOLO ARGILOSO DO MUNICÍPIO DE APUCARANA
E PÓ DE BRITA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

**Analysis of the mixture of clayey soil from the municipality of Apucarana and
gravel dust for paving purposes**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Msc. Lucas Lauer Verdade

APUCARANA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LEONARDO CESAR DE SOUZA SOWINSKI

**ANÁLISE DA MISTURA DE SOLO ARGILOSO DO MUNICÍPIO DE APUCARANA
E PÓ DE BRITA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14/junho/2022

Prof. Msc. Lucas Lauer Verdade
Titulação Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana

Prof. Msc. Augusto Montor de Freitas Luiz
Titulação Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana

Prof. Msc. Juliana Maria de Souza
Titulação Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana

APUCARANA

2022

Dedico esse trabalho a Deus, à minha família e a todos que me incentivaram, me inspiraram e colaboraram para que isso tudo fosse possível

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por me dar força e coragem nos momentos difíceis, iluminar meus passos, me abençoar e me ajudar durante todo o período na graduação.

A minha família pelo apoio, especialmente a minha mãe, Andreia, mulher forte e guerreira, que sempre me inspirou. Também ao meu pai, Júlio, pelos incentivos e pela ajuda durante toda a graduação. Aos meus irmãos, Alan, Leticia, Laura e Anna pela motivação durante todo esse tempo.

Agradeço a minha namorada, Amanda, que esteve ao meu lado em toda a graduação, pela motivação, companheirismo, força e compreensão durante esta etapa.

Aos professores da UTFPR, pelos ensinamentos, experiências e conselhos transmitidos. E em especial, meu orientador, Prof^o Msc. Lucas Lauer Verdade, pela orientação durante o trabalho de conclusão de curso.

Aos meus amigos, pelo convívio, conversas e ajudas durante todo esse processo, que não será esquecido.

À Politécnica Engenharia, pela oportunidade do estágio, que me enriqueceu de conhecimentos e pela disponibilização do laboratório para realização de parte dos ensaios dessa pesquisa. Ao Laboratorista Antônio, pelos diversos ensinamentos que colaboraram com o desenvolvimento dos ensaios realizados neste trabalho.

Agradeço à Pedreira Brasil, que forneceu os materiais utilizados durante essa pesquisa.

A todos os profissionais da UTFPR Campus Apucarana, que fizeram parte de todo esse processo, mesmo que indiretamente.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa, meus sinceros agradecimentos.

*“Grandes resultados requerem grandes
ambições.”
Heráclito de Éfeso (Costa, 2012).*

RESUMO

As propriedades mecânicas dos solos estão diretamente ligadas ao seu desempenho nas camadas de pavimentos. O solo tipicamente argiloso presente na região de Apucarana-PR possui por sua natureza, má empregabilidade nas camadas dos pavimentos devido a sua baixa capacidade de suporte. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de uma estabilização granulométrica do solo com incorporações de diferentes teores de pó de brita (10, 30 e 50%) e avaliar sua utilização nas camadas de pavimentos flexíveis. Neste trabalho foram coletadas amostras indeformadas de solo provenientes de uma jazida de empréstimo e o pó de brita foi fornecido por uma pedreira localizada no município de Apucarana. Os materiais coletados foram utilizados nos ensaios laboratoriais de caracterização, compactação e Índice de Suporte California. Por meio dos ensaios realizados, foi possível verificar o crescimento da massa específica seca e redução da umidade ótima conforme o acréscimo de pó de brita no solo, também foi percebido aumento na capacidade de suporte conforme aumento no teor de pó de brita incorporado. Os maiores valores encontrados de massa específica seca e ISC foram obtidos na amostra composta por 50% de pó de brita. Os resultados obtidos nos ensaios de ISC apresentaram aumento no índice em relação ao solo natural, com base nos critérios para empregabilidade em camadas de pavimentos rodoviários, a amostra com 10% de pó de brita apresentou resultados satisfatórios para camadas de reforço de subleito, já as amostras com 30 e 50% de pó de brita incorporado atendem aos critérios para sub-base de pavimentos.

Palavras-chave: pavimentação; estabilização de solo; solo argiloso; pó de brita.

ABSTRACT

The mechanical properties of soils are directly linked to their performance in pavement layers. The typically clay soil present in the region of Apucarana-PR has, by its nature, poor use in the pavement layers due to its low support capacity. The present work has as objective to evaluate the mechanical behavior of a granulometric stabilization of the soil with incorporation of different contents of gravel dust (10, 30 and 50%) and to evaluate its use in the layers of flexible pavements. In this work, undisturbed soil samples were collected from a borrowed deposit and gravel dust was provided by a quarry located in the municipality of Apucarana. The collected materials were used in characterization test, compaction test and California Bearing Ratio. Through the tests performed, it was possible to verify the growth of the dry density and the reduction of the optimal moisture according to the addition of gravel dust in the soil, an increase in the carrying capacity was also observed as an increase in the content of incorporated gravel dust. The highest values found for dry density and CBR were obtained in the sample composed of 50% of gravel dust. The results obtained in the CBR tests showed an increase in the index in relation to the natural soil, based on the criterion for employability in layers of road pavements, the sample with 10% of gravel dust showed satisfactory results for subgrade reinforcement layers, while the samples with 30 and 50% of gravel dust meet the criterion for sub-base layer.

Keywords: paving; soil stabilization; clay soil; gravel dust.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas dos pavimentos (a) flexíveis e semirrígidos e (b) rígidos..	17
Figura 2 - Distribuição de tensões nos pavimentos (a) flexíveis e (b) rígidos...	18
Figura 3 - Classificação das bases e sub-bases	19
Figura 4 - Curvas de compactação típicas para quatro solos	21
Figura 5 - Fases dos solos	25
Figura 6 - Relação entre os limites de consistência e o estado do solo	26
Figura 7 - Exemplo de curvas granulométricas	29
Figura 8 - Local de retirada das amostras.....	34
Figura 9 - Local da coleta das amostras deformadas de solo.....	35
Figura 10 - Local de coleta do pó de brita.....	36
Figura 11 - Amostras de solo (a) após a coleta (b) seca e destorroadada	37
Figura 12 - Análise granulométrica (a) decantação (b) peneiramento.....	38
Figura 13 - Ensaio de limite de liquidez.....	39
Figura 14 - Ensaio de limite de plasticidade	40
Figura 15 - Ensaio de determinação da massa específica dos sólidos.....	41
Figura 16 - Composição das misturas.....	41
Figura 17 - Etapa de expansão do ensaio de ISC	43
Figura 18 - Penetração no ensaio de ISC	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica do solo	46
Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do pó de brita	47
Gráfico 3 - Distribuição granulométrica das misturas	48
Gráfico 4 - Curvas de Compactação para as amostras	50
Gráfico 5 - Curvas de ISC das amostras	51
Gráfico 6 - Curvas de expansão das amostras	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos materiais empregados no pavimento	23
Quadro 2 - Classificação dos solos (Transportation Research Board)	27
Quadro 3 - Valores prováveis de ISC para classificação TRB.....	28
Quadro 4 - Classificação dos solos – SUCS	30
Quadro 5 - Valores prováveis de ISC para classificação SUCS	30
Quadro 6 - Faixas de composição granulométrica para bases estabilizada.....	32
Quadro 7 - Nomenclatura das misturas	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalo do tamanho dos grãos para as frações dos solos.....	24
Tabela 2 - Símbolos utilizados pelo SUCS	29
Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização do solo	45
Tabela 4 – Resultados Análise Granulométrica Conjunta	46
Tabela 5 - Resultados da análise granulométrica do agregado	47
Tabela 6 - Faixas granulométricas das misturas	49
Tabela 7 - Valores de massa específica máxima seca e umidade ótima obtidas no gráfico.....	49
Tabela 8 - Resumo dos resultados do ensaio de ISC	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	15
1.2	Objetivos Específicos	15
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	16
2.1	Pavimentação	16
2.1.1	Classificação dos pavimentos	16
2.1.2	Revestimentos	18
2.1.3	Base e sub-base	18
2.1.4	Subleito	19
2.2	Propriedades mecânicas para pavimentação	20
2.2.1	Compactação	20
2.2.2	Índice de Suporte Califórnia (ISC-CBR)	22
2.3	Propriedades do Solo	23
2.3.1	Textura do solo	23
2.3.2	Índices físicos	24
2.3.3	Limites de consistências	26
2.3.4	Classificação dos solos	27
2.4	Estabilização de solos	31
2.4.1	Estabilização mecânica	31
2.4.2	Estabilização granulométrica	31
2.4.3	Estabilização química	32
2.5	Utilização do pó de brita na pavimentação	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Coleta dos materiais	34
3.2	Ensaio de caracterização	36
3.2.1	Preparo das amostras	36
3.2.2	Análise granulométrica conjunta	37
3.2.3	Análise granulométrica por peneiramento	38
3.2.4	Limite de liquidez	38
3.2.5	Limite de plasticidade	39
3.2.6	Massa específica dos sólidos	40
3.3	Composição das misturas	41
3.4	Ensaio mecânico	42

3.4.1	Ensaio de compactação	42
3.4.2	Índice Suporte Califórnia (ISC-CBR)	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Caracterização do Solo	45
4.2	Caracterização do Pó de Brita	47
4.3	Composição das misturas	48
4.4	Compactação	49
4.5	Índice de Suporte Califórnia	51
5	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte de um país está diretamente ligado a seu crescimento e desenvolvimento. Garantir que os commodities cheguem ao seu destino é de suma importância para manter o crescimento econômico do país. De acordo com Salomão *et al.* (2019), o transporte rodoviário é o mais expressivo para o Brasil, visto que é o único modal que atende todos os pontos no território nacional. A pavimentação de estradas é fundamental para garantir que o transporte de mercadorias e passageiros possa ocorrer de forma segura, confortável e mais econômica ao usuário.

O transporte de cargas é um grande contribuinte para o PIB do país, no primeiro quadrimestre de 2021, foram movimentados R\$ 2,9 trilhões em cargas no país (AT&M TECNOLOGIA, 2021).

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018), em 2017 o transporte rodoviário foi responsável por mais de 60% da movimentação de mercadorias e 90% dos passageiros no Brasil. Outro dado apresentado pelo CNT é a extensão da malha rodoviária não pavimentada no país, que chega à 1,35 milhões de quilômetros, equivalente a cerca de 78,4% da malha rodoviária total.

A infraestrutura rodoviária brasileira é dividida em duas realidades, uma gerida por concessões cedidas ao setor privado e outra gerida com recursos públicos, sendo esta predominante no país. Com o passar dos anos, o investimento do governo federal em rodovias vem diminuindo ano após ano. Em 2020 foram investidos R\$ 6,7 bilhões em rodovias, valor 31,7% menor que o investimento apenas em manutenção em 2010 (CNT, 2021).

O solo da região de Apucarana é caracterizado tipicamente como argiloso, que segundo a classificação dos solos Transportation Research Board – TRB apresentada pela AASHTO tem comportamento tolerável a mal quando empregado em subleitos de pavimentos. Oliveira (2021) confirma a classificação TRB, obtendo ISC (Índice de Suporte Califórnia) de 10,43% com o solo argiloso da região de Apucarana.

O presente trabalho surge em busca de modificar e melhorar o comportamento mecânico do solo do município de Apucarana, para que esse possa ser empregado em camadas de base ou sub-base de pavimentos flexíveis empregados em estradas da região.

Assim serão avaliadas misturas do solo argiloso com pó de brita em diferentes proporções, para verificar se as propriedades mecânicas mínimas sejam atendidas para o emprego nas camadas dos pavimentos.

1.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a empregabilidade de misturas de solo com pó de brita em diferentes proporções, em camadas de base ou sub-base de pavimentos flexíveis na região Norte Central do Paraná.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Caracterizar fisicamente o solo coletado *in loco*;
- Determinar os parâmetros de compactação do solo;
- Mensurar a expansibilidade das misturas de solo;
- Determinar o Índice de Suporte California para as misturas de solo;

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

No capítulo Embasamento teórico será discutido conceitos básicos referente à pavimentação e as propriedades necessárias para o emprego de materiais nas camadas dos pavimentos. Posteriormente serão abordados itens referentes às propriedades dos solos e formas de melhorar algumas de suas propriedades.

2.1 Pavimentação

De acordo com Balbo (2007, p.35), “o pavimento é uma estrutura não perene, compostas por camadas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal”. Outra definição dada para o pavimento é a apresentada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), na qual o pavimento é definido como a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finita, assentadas sobre a fundação, designado como subleito.

Para Bernucci *et al.* (2008) o pavimento deve resistir aos esforços do tráfego e do clima, o que garante ao usuário a melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Já segundo Balbo (2007), a pavimentação de uma via de circulação de veículos, tem como objetivo a melhoria operacional para o tráfego, para criar uma superfície mais regular, aderente e menos ruidosa, em busca de garantir um tráfego confortável e seguro.

A criação de vias de transporte não são um feito recente, existem registros da criação de estradas pavimentadas desde a época do Império Egípcio, estas não destinadas à veículos, mas sim ao transporte de cargas para a construção das pirâmides (SAUNIER, 1936 apud BERNUCCI *et al.*, 2008).

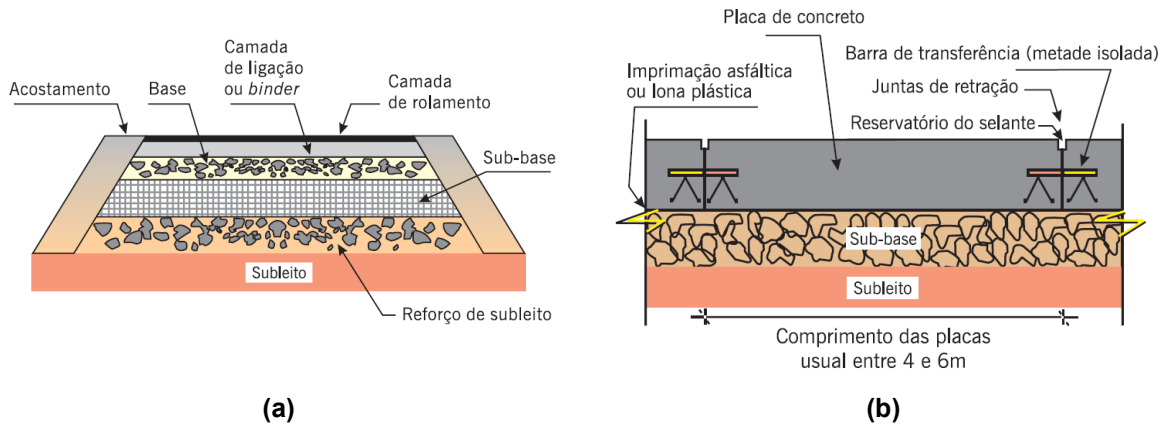
Outro registro importante de criação de estradas é a Via Ápia, que ligava Roma as províncias orientais. Nessa época, durante a consolidação da República, os romanos empenhavam-se para abrir novos caminhos para expandir o seu território, com isso cada vez mais aprimoravam-se as técnicas de pavimentação existentes na época (BALBO, 2007).

2.1.1 Classificação dos pavimentos

A classificação do Departamento de Estradas de Rodagem-SP (DER-SP, 2006) divide os pavimentos em três tipos: flexível, semirrígido ou rígido. A Figura 1 mostra as camadas que compõe os pavimentos, onde em (a) estão ilustradas as

camadas dos pavimentos flexíveis e semirrígidos e em (b) as camadas dos pavimentos rígidos.

Figura 1 - Camadas dos pavimentos (a) flexíveis e semirrígidos e (b) rígidos

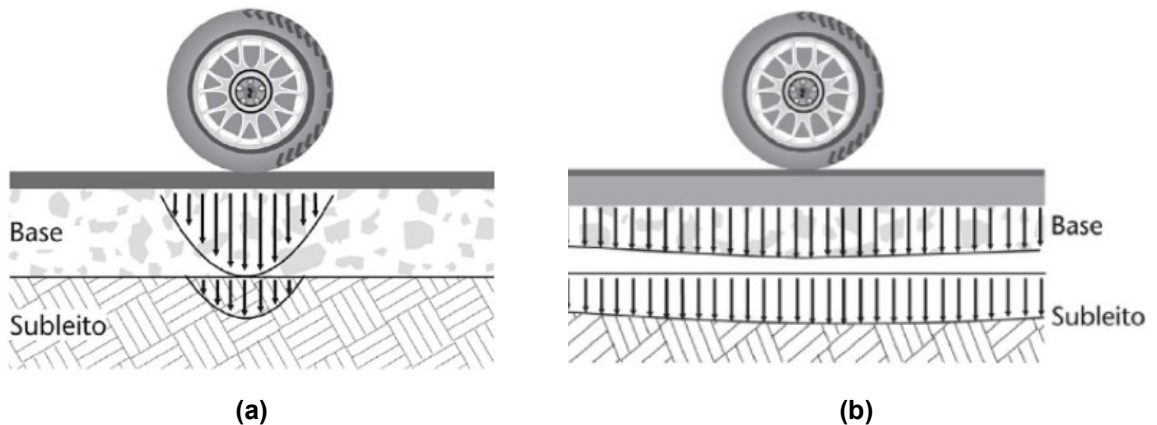


Fonte: Bernucci et al. (2008)

Os pavimentos flexíveis são aqueles constituídos por revestimento asfáltico, sobre camada de base granular ou de solo estabilizado granulometricamente. Semelhante ao flexível, o pavimento semirrígido é constituído por revestimento asfáltico, porém as camadas de base e sub-base são compostas por material estabilizado com adição de cimento. Já o pavimento rígido é composto por revestimento em placas de concreto de cimento Portland, sobre camada de sub-base granular ou cimentada (DNIT, 2006).

A Figura 2 apresenta em (a) a distribuição dos esforços de maneira concentrada no pavimento flexível, nesse tipo de pavimento os esforços provenientes do tráfego são transferidos de forma concentrada às diversas camadas do pavimento e em (b) a distribuição uniforme dos esforços no pavimento rígido, nesse tipo de pavimento, os esforços provenientes do tráfego são absorvidos principalmente pelas placas de concreto de cimento Portland, onde as tensões na sub-base ou subleito da via são aliviadas (DNIT, 2006).

Figura 2 - Distribuição de tensões nos pavimentos (a) flexíveis e (b) rígidos



Fonte: Balbo (2007)

2.1.2 Revestimentos

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), o revestimento é a camada que se destina a receber as cargas dos veículos e mais indiretamente as ações do clima, deve ser impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento. Balbo (2007) ainda aponta que o revestimento deverá receber as cargas estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação.

As camadas de revestimento em pavimentos rígidos, são compostas por placas de concreto de cimento Portland. Já para pavimentos flexíveis ou semirrígidos, os revestimentos são compostos geralmente por concreto asfáltico (DER-SP, 2006).

Os pavimentos asfálticos geralmente são subdivididos em camadas por questões técnicas, construtivas e econômicas, sendo a camada superior definida como camada de rolamento e a camada em contato com a base definida como camada de ligação (BALBO, 2007).

2.1.3 Base e sub-base

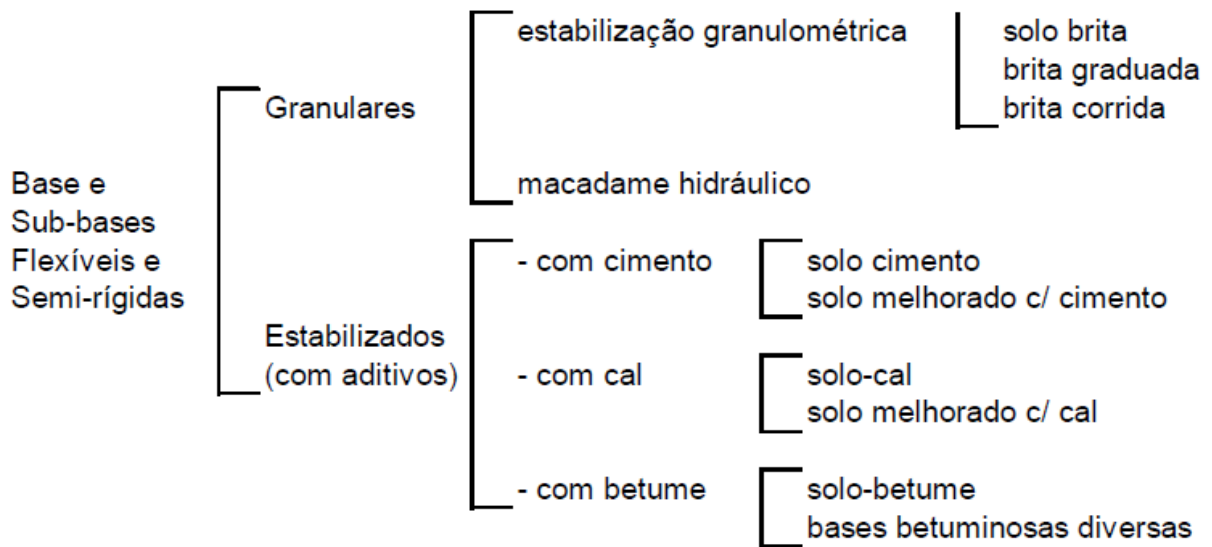
Segundo Pessoa Júnior (2014), a camada de base tem função de transmitir os esforços verticais oriundos dos veículos para as camadas subjacentes de forma adequada. Essa camada só está presente nos pavimentos flexíveis e semirrígidos, que podem ser compostas de:

- Solo;
- Misturas de solos;
- Brita;

- Misturas de solo com areia, brita ou cimento;

Já a sub-base, segundo DNIT (2010), é uma camada complementar a base que deve ser planejada quando não se deseja executar a base diretamente sobre o subleito ou reforço de subleito, por questões técnico-econômicas, ou também para regularizar a espessura da base. A Figura 3 mostra a classificação do DNIT (2006) para as camadas de base e sub-base.

Figura 3 - Classificação das bases e sub-bases



Fonte: DNIT (2006)

2.1.4 Subleito

Senço (2008) define subleito como o terreno de fundação do pavimento e apenas a camada próxima a superfície é considerada como subleito, pois, à medida que se aprofunda no maciço, as pressões são reduzidas a ponto de serem consideradas desprezíveis. Nessa camada deve ser realizada regularização de subleito, definida pelo DNIT (2010) como a operação destinada a conformar o leito estradal, transversal e longitudinalmente e deve obedecer às larguras e cotas de projeto.

Após a escolha do método de dimensionamento do pavimento, são realizados ensaios que determinam a resistência do material do subleito e com isso, avalia-se a necessidade da construção do reforço de subleito, com um solo de melhor qualidade, para que sejam toleradas maiores pressões oriundas das cargas aplicadas sobre o pavimento. A execução de reforço no subleito não é obrigatória, mas por razões econômicas, em casos que o subleito apresente baixa resistência à cisalhamento,

esta camada é empregada para que as camadas de base e sub-base não se tornem tão espessas, durante o dimensionamento dos pavimentos (BALBO, 2007).

2.2 Propriedades mecânicas para pavimentação

Neste subtópico será abordado as propriedades mecânicas necessárias para aplicação de materiais nas camadas do pavimento.

2.2.1 Compactação

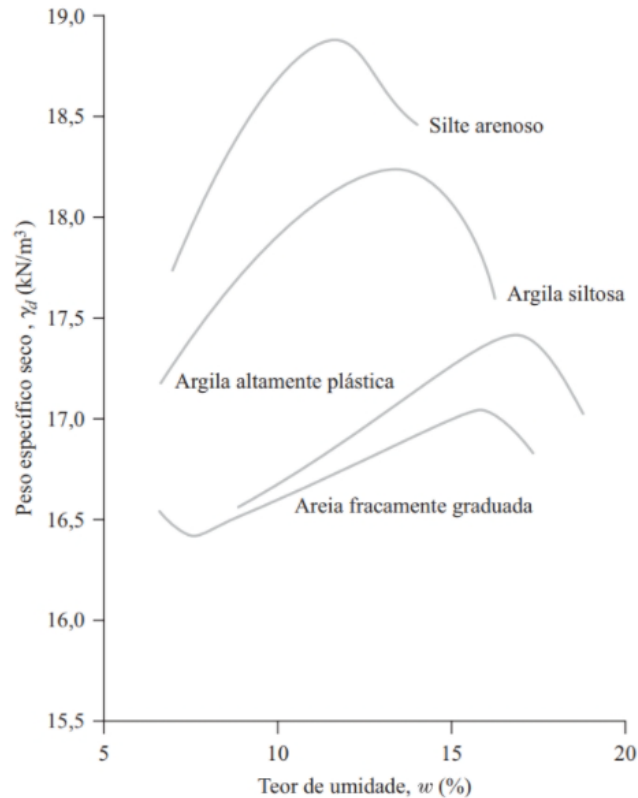
De acordo com Senço (2008), compactação de um solo é a operação de redução de vazios, através da compressão mecânica, como descoberto por Ralph R. Proctor, a compactação obtida está diretamente ligada à umidade presente no solo. Já segundo Massad (2010), a compactação de solos é qualquer redução do índice de vazios mediante a expulsão ou compressão dos poros vazios do solo, através de um processo mecânico em um curto tempo.

Segundo Das (2007), na construção de taludes rodoviários ou qualquer obra de terra, os solos soltos devem ser compactados para que aumente seu peso específico, além de aumentar a resistência dos solos, o que garante maior resistência das fundações construídas na superfície. Além das características apresentadas, Massad (2010), aponta propriedades como homogeneização do solo, aumento da resistência ao cisalhamento, aumento da resistência à erosão e redução dos recalques.

O ensaio de compactação utilizado para determinação das curvas de compactação é denominado com ensaio de Proctor, que no Brasil é regida pela NBR 7182: *Solo - Ensaio de compactação* (ABNT, 2020). O ensaio possui três diferentes variações da energia de compactação, são elas: normal, intermediária e modificada, sendo que a diferença entre elas é o tamanho do cilindro, soquete, número de camadas e golpes (ABNT, 2020).

Um dos fatores que mais afetam a compactação dos solos é justamente o tipo do solo compactado, a massa específica seca máxima depende dos formatos das partículas, densidade relativa dos grãos e tipos de minerais argilosos que compõem o solo (DAS, 2019). A Figura 4 apresenta diferentes formatos de curvas de compactação para tipos dos solos distintos.

Figura 4 - Curvas de compactação típicas para quatro solos



Fonte: ASTM D-698, 2012 apud Das (2019)

A função do ensaio de compactação, para Nogueira (1995), é determinar a máxima massa específica aparente seca, através da variação da umidade, para uma dada energia de compactação, aplicada ao solo através de processos dinâmicos.

A curva do ensaio de Proctor gera duas áreas no gráfico, quando abaixo da umidade ótima, a adição de água tem efeito de lubrificação das partículas e auxilia na redução de vazios, já acima da umidade ótima, as partículas de água afastam os grãos do solo e ocupa o lugar do mesmo, o que provoca a redução na massa específica (MASSAD, 2010).

Com os valores de massa específica máxima determinados em projeto, deve-se realizar o controle da compactação de solos em campo, para garantir a qualidade do serviço. De acordo com Jaworski (1997), com a determinação da densidade do solo *in loco*, é possível calcular o grau de compactação do solo após um determinado número de passadas do equipamento de compactação empregado. O grau de compactação (G.C) é dado pela relação entre a massa específica seca do material em campo ($\rho_{d,campo}$) e a massa específica máxima seca em laboratório ($\rho_{d,lab}$), ilustrada na Equação 1.

$$G. C = \frac{\rho_{d,campo}}{\rho_{d,lab}} \quad (1)$$

O valor obtido para o grau de compactação não deve ser inferior ao fixado em projeto. Caso não seja atingido a compactação necessária, deverá ser realizado nova compactação no material (DNIT, 2006).

2.2.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC-CBR)

O Índice de Suporte Califórnia (ISC), traduzido de *California Bearing Ratio* (CBR), foi concebido no final da década de 1920, para identificar uma possível ruptura do material empregado no subleito, visto que nessa época este defeito era corriqueiro no estado da Califórnia (PORTER, 1950 apud BERNUCCI *et al.*, 2008). Segundo Senço (2008), o ISC é uma das características mais aceitas para avaliar o comportamento mecânico de um solo, este atuante como fundação (subleito) ou camada do pavimento.

O ISC é a relação percentual entre a pressão necessária para um pistão padronizado penetrar em uma amostra de solo (pressão calculada ou corrigida) e a pressão necessária para a atingir a mesma penetração em uma amostra de brita padrão (SENÇO, 2008). O cálculo do valor do ISC é exemplificado pela Equação 2, adota-se o maior dos valores entre as pressões necessárias para penetração de 0,1 e 0,2 polegadas (DNIT, 2006).

$$ISC = \frac{\textit{pressão calculada ou corrigida}}{\textit{pressão padrão}} \quad (2)$$

De acordo com o DNIT (2006), o valor obtido entre essa relação, permite, por meio de equações empíricas, determinar as espessuras necessárias para as camadas do pavimento em função do volume de tráfego. O método de ensaio do ISC é regido pela NBR 9895: *Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio* (ABNT, 2017a) e pelo DNIT 172: *ME - Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio* (DNIT, 2016).

Outro parâmetro importante obtido no ensaio do ISC é a expansão. Conforme aponta Bernucci *et al.* (2008), os valores significativos de expansão apresentam

grandes deformações quando solicitados, o valor máximo aceitável de expansão para subleito é 2%, em casos de valores superiores recomenda-se a troca de solo ou reforço com cimento ou cal.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER (1981) apresenta a classificação dos materiais empregados nos pavimentos, representados no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos materiais empregados no pavimento

Camada do Pavimento	ISC	Expansão
Subleito	$\geq 2\%$	$\leq 2\%$
Reforço do Subleito	$> ISC_{subleito}$	$\leq 1\%$
Sub-base	$\geq 20\%$	$< 1\%$
Base	$\geq 80\%$	$\leq 0,5\%$

Fonte: DNIT (2006)

2.3 Propriedades do Solo

Para Das (2007), as partículas que constituem o solo são produto do processo de erosão das rochas e suas propriedades físicas são determinadas a partir dos minerais constituintes da rocha de origem, assim como pela forma e composição química dos grãos.

Segundo Fiori (2015), o solo pode ser definido como a junção entre partículas sólidas e vazios, esses podem ser preenchidos com água, ar ou ambos. Já conforme define o DNIT (2006, p.17), “no âmbito da engenharia rodoviária, considera-se solo todo tipo de material orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície da terra”.

2.3.1 Textura do solo

Define-se textura como o tamanho das partículas de sólidos que compõe os solos, essa é uma importante característica para definir a composição da massa de solo. O método para mensurar a textura de um solo é a distribuição granulométrica do material (LEÃO, 2018).

Na natureza são encontrados solos com diversos tamanhos de grãos e estes não são facilmente distinguíveis sem a realização de ensaios de laboratório. A NBR 6502: *Rochas e solos* (ABNT, 1995), apresenta intervalos de tamanhos de para cada fração de solo, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Intervalo do tamanho dos grãos para as frações dos solos

Fração	Intervalo
Bloco de rocha	> 1 m
Matacão	200 mm a 1 m
Pedra de mão	60 mm a 200 mm
Pedregulho	2,0 mm a 60 mm
Areia grossa	0,6 mm a 2,0 mm
Areia média	0,2 mm a 0,6 mm
Areia fina	0,06 mm a 0,2 mm
Silte	0,002 mm a 0,06 mm
Argila	<0,002 mm

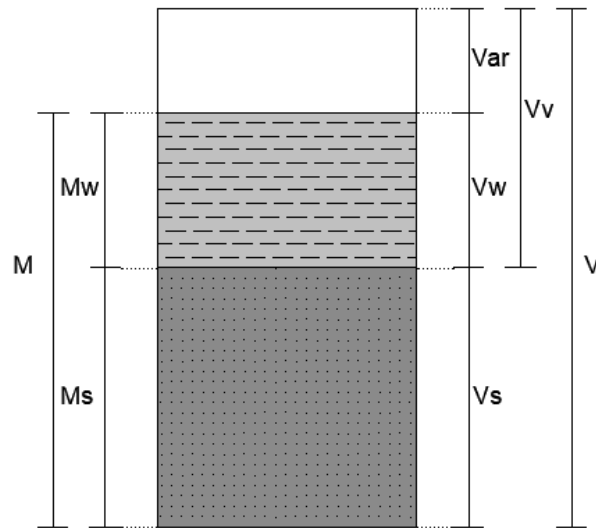
Fonte: NBR 6502 (ABNT, 1995)

O ensaio de análise granulométrica é realizado em 2 etapas, conforme indicado pela NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica* (ABNT, 2018), a primeira é o peneiramento e a segunda a sedimentação. A curva granulométrica deve ser elaborada de forma que na abcissa seja representada a granulometria das partículas em escala logarítmica e na ordenada as porcentagens em peso das partículas passantes, em escala aritmética (CAPUTO, 1998; ABNT, 2018).

2.3.2 Índices físicos

Como destaca Caputo (1998, p. 37), “o solo é constituído por um conjunto de partículas sólidas, deixando vazios entre si que poderão estar parcialmente ou totalmente preenchidos pela água[...]”. Pode-se encontrar na natureza, solos com sistemas trifásicos, composto por sólidos, água e ar (DAS, 2009). A Figura 5 apresenta o solo natural nas suas três fases.

Figura 5 - Fases dos solos



Fonte: Adaptado de Das (2007)

Ao assumir que o peso do ar é irrelevante ao peso da amostra, o peso total (P), é dado pela soma entre o peso dos sólidos (P_s) e o peso da água (P_w). Em relação ao volume, o volume de vazios, é definido como o volume de água (V_w) e o volume de ar (V_{ar}), já o volume total é representado pela soma do volume de vazios (V_v) e o volume de sólidos (V_s).

São empregados alguns índices que correlacionam pesos e volumes das três fases do solo, para identificar o estado do solo, estes são definidos conforme Pinto (2006).

Umidade (w): Relação entre a massa da água e a massa dos sólidos;

Índice de vazios (e): Relação entre o volume de vazios e volume de sólidos;

Porosidade (n): Relação entre o volume de vazios e o volume total;

Grau de saturação (S_r): relação entre o volume de água e o volume de vazios;

Peso específico dos sólidos (γ_s): relação entre o peso das partículas sólidas e seu volume;

Peso específico natural (γ_{nat}): Relação entre o peso total e seu volume total;

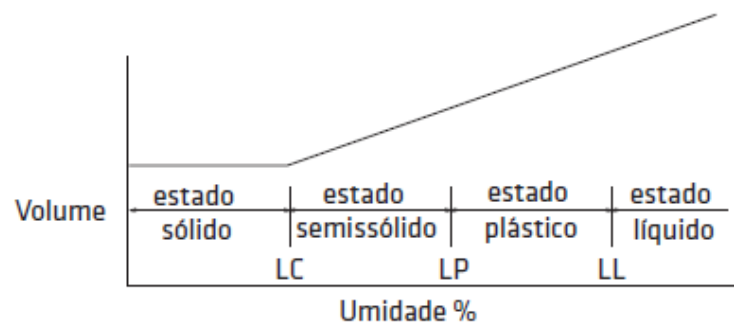
Peso específico aparente seco (γ_d): relação entre o peso dos sólidos e o volume total;

2.3.3 Limites de consistências

Solos com granulometria fina e presença de minerais de argila podem ser remoldados na presença de água, o comportamento desse solo é extremamente variável em função ao teor de umidade incorporado. Em um estado quase líquido, este se comporta como uma lama e no estado sólido tem comportamento semelhante a cerâmicas (DAS, 2009; FIORI, 2015).

Como aborda Fiori (2015), existem três limites de consistências, o limite de contração (LC), corresponde a transição entre os estados sólido e semissólido, o limite de plasticidade (LP), que equivale a transição entre os estados semissólido e líquido, e o limite de liquidez (LL), ponto que define o teor de umidade acima do qual o solo passa do estado plástico ao líquido, como exemplificado na Figura 6.

Figura 6 - Relação entre os limites de consistência e o estado do solo



Fonte: Fiori (2015)

O limite de contração é definido por Das (2007) como o teor de umidade em que o volume de solo passa a aumentar com o acréscimo de água no solo, atingindo um ponto de equilíbrio.

O LP é determinado pelo menor percentual de umidade em que o solo começa a se fraturar na tentativa de se moldar um cilindro de 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento, abaixo do LP o solo apresenta um comportamento quebradiço (FIORI, 2015). No Brasil, a norma para determinação do LP é a NBR 7180: *Solo — Determinação do limite de plasticidade* (ABNT, 2016b).

O LL corresponde à porcentagem de umidade em que o solo começa a se comportar como um líquido e apresentar coesão nula entre as partículas de solo. A determinação do LL é feita através do aparelho de Casagrande e normatizado pela NBR 6459: *Solo — Determinação do limite de liquidez* (ABNT, 2017b), em que o LL condiz ao teor de umidade do solo para fechar uma ranhura aberta em uma concha após aplicar 25 golpes (quedas de 1cm e ritmo constante).

2.3.4 Classificação dos solos

De acordo com Senço (2008), os solos podem ser classificados em função do seu uso ou condicionamento. A forma mais fácil de classificação em vista a aplicação em pavimentações é a classificação em função da granulometria do solo. Porém, nesta classificação, não se leva em conta a plasticidade do solo, fator fundamental no estudo do uso de solos na pavimentação.

O sistema de classificação da Associação Americana de Rodovias Estaduais e Autoridades de Transporte (AASHTO), também conhecido como Transportation Research Board (TRB), é um sistema bastante utilizado na pavimentação. Este sistema leva em consideração na classificação a granulometria, limite de liquidez, índice de liquidez e índice de grupo (DAS, 2009; BALBO, 2007). Na classificação TRB, os solos são classificados em grupos de acordo com o tamanho dos grãos, limites de consistência e do índice de grupo (DNIT, 2006). No Quadro 2 é apresentado a classificação dos solos, segundo o TRB. A classificação deve ser realizada com os dados de ensaio, da esquerda para direita e de cima para baixo.

Quadro 2 - Classificação dos solos (Transportation Research Board)

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira N° 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria - % passando na peneira											
N° 10	50 máx.		51 min.								
N° 40	30 máx.	30 máx.	10 máx.								
N° 200	15 máx.	15 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira N° 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41. min	40 máx.	41. min	40 máx.	41. min	40 máx.	41. min
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltoso ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT (2006)

O índice de grupo (IG), é utilizado para avaliar a qualidade do solo como material de subleito em função da porcentagem passante na peneira N°200 (F_{200}), LL e IP. O IG é determinado pela Equação 3.

$$IG = (F_{200} - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F_{200} - 15)(IP - 10) \quad (3)$$

O Quadro 3 apresenta valores estimados com base nos grupos de solos obtidos através da classificação TRB.

Quadro 3 - Valores prováveis de ISC para classificação TRB

SOLOS	ISC
A-1-a	40 a mais de 80
A-1-b	20 a mais de 60
A-2-4 e A-2-5	25 a mais de 60
A-2-6 e A-2-7	12 a 30
A-3	15 a 40
A-4	4 a 25
A-5	menos de 2 a 10
A-6 e A-7	menos de 2 a 15

Fonte: DNIT (2006)

Para utilização em camadas de base, são indicados solos do tipo A-1-a, de acordo com o Quadro 1, pois são os únicos que apresentam ISC superior a 80. Já em camadas de sub-base podem ser utilizados solos dos grupos A-1-b, A-2, A-3 e A-4, pois atingem ISC superior a 20.

Outro modo de classificação dos solos é o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), no qual baseia na identificação dos solos, parâmetros como textura e plasticidade. Na classificação do SUCS são considerados características como: porcentagem de pedregulhos, areia e finos, forma da curva granulométrica do material, além da plasticidade e compressibilidade (DNIT, 2006).

O SUCS baseia sua classificação de acordo com a textura e plasticidade dos solos, e os agrupa de acordo com seus comportamentos quando empregados em estradas, aterros e fundações. Neste sistema, os solos são classificados em dois amplos grupos, os solos com grãos grossos e os solos de grãos finos (DAS, 2009; DNIT, 2006).

Os solos com grãos grossos são naturalmente compostos por pedregulhos ou areias, com mais de 50% retidos na peneira N°200. Esses possuem prefixo “G” ou “S”. A Tabela 1 apresenta o significado dos prefixos utilizados pelo SUCS.

Já os solos de grãos finos, são constituídos de 50% ou mais dos grãos passantes na peneira N°200. Os grupos de solos finos possuem prefixos “M”, “C”, “O”. Além do grupo “Pt”, utilizado para turfas e outros solos altamente orgânicos. A partir da caracterização de siltes e argilas, a plasticidade passa a ser empregada para classificação dos solos (DAS, 2009).

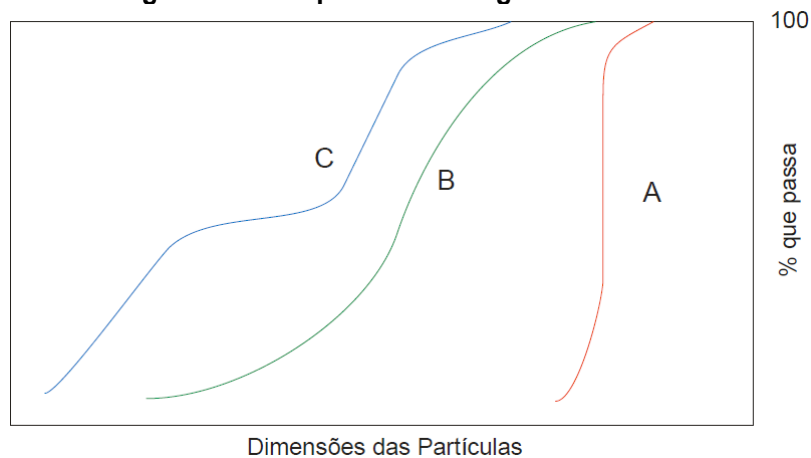
Tabela 2 - Símbolos utilizados pelo SUCS

Sigla	Significado
G	Pedregulho
S	Areia
M	Silte
C	Argila
O	Solo Orgânico
W	Bem graduado
P	Mal graduado
H	Alta Plasticidade
L	Baixa Plasticidade
Pt	Turfas

Fonte: DAS (2009)

As siglas “W” e “P” se referem ao formato da curva granulométrica, solos bem graduados apresentam curva granulométricas contínuas e bem distribuídas (curva B da Figura 7), já solos mau-graduados apresentam curvas descontínuas e com quebras na distribuição dos grãos (curva C) ou concentração em apenas uma faixa (curva A).

Figura 7 - Exemplo de curvas granulométricas



Fonte: DNIT (2010)

O Quadro 4 apresenta os grupos de solos do SUCS.

Quadro 4 - Classificação dos solos – SUCS

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: Mais de 50% retido na peneira n°200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira n°4	Pedregulhos sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped. com pouco ou nenhum fino
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia de ped. com pouco ou nenhum fino
		Pedregulhos com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. areia e silte
			GC	Pedregulhos argilosos, ou misturas de ped. areia e argila
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira n°4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila
SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: Mais de 50% retido na peneira n°200	Siltes e Argilas com LL < 50	ML	Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas ou argilosas	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas	
		OL	Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade	
	Siltes e Argilas com LL > 50	MH	Siltes - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade	
	Solos Altamente Orgânicos	PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.	

Fonte: DNIT (2006)

O Quadro 5 apresenta os valores estimados de ISC com base nos grupos de solos da classificação SUCS.

Quadro 5 - Valores prováveis de ISC para classificação SUCS

SOLOS	ISC
GW	40 a mais de 80
GP	30 a mais de 60
GM	20 a mais de 60
GC e SW	20 a 40
SP e SM	10 a 40
SC	5 a 20
ML, CL e CH	menos de 2 a 15
MH	menos de 2 a 10
OL e OH	menos de 2 a 5

Fonte: DNIT (2006)

Neste tipo de classificação, são recomendadas para emprego em camadas de base os solos do grupo GW. Já em camadas de sub-base podem ser empregados solos dos grupos GP, GM, GC, SW, SP e SM.

Para possibilitar o emprego de solos nas camadas do pavimento com ISC inferior ao indicado no Quadro 1, é necessário realizar algum tipo de estabilização para que este parâmetro seja atendido.

2.4 Estabilização de solos

Segundo França (2003), estabilizar um solo é dar a ele condições suficientes para resistir aos esforços, ações climáticas ou desgastes provenientes do tráfego. Villibor (1978) aponta que a estabilização tem como finalidade aumentar a resistência, reduzir a compressibilidade e a sensibilidade à fatores externos, principalmente umidade, além de controlar a permeabilidade de acordo com a necessidade.

2.4.1 Estabilização mecânica

São denominadas de estabilizadas mecanicamente as camadas do pavimento que não recebem adição de ligantes, aglomerantes ou mesmo sofra uma correção granulométrica e se tornam estáveis somente pelo esforço mecânico proveniente da compressão e adensamento das camadas (BALBO, 2007).

2.4.2 Estabilização granulométrica

Villibor (1978) define a estabilização granulométrica como uma manipulação dos solos, em proporções adequadas para garantir uma mistura com estabilidade maior que a do material original.

Alguns dos materiais estabilizados granulometricamente utilizados em camadas de bases e sub-bases são apresentados por Balbo (2007):

Solo brita (SB): mistura de solo com propriedades indesejáveis para pavimentação, com a adição de agregados graúdo.

Bica corrida (BC): Material não classificado, é retirado após passar pelo britador secundário antes de passar pelo processo de peneiramento e separação por frações. Geralmente possui má graduação e não possui controle granulométrico.

Brita graduada simples (BGS): Material resultante da mistura adequada de agregados britados, peneirados e classificados. É composta por faixas granulométricas que variam de brita 2 ao pó de brita.

Macadame hidráulico (MH): Resultado da compressão de agregado graúdo, com preenchimento dos vazios por agregados miúdos com auxílio de água, compressão mecânica e varrição.

Macadame seco (MS): Camada composta por materiais granulares resultante do rachão e preenchimento com agregado miúdo com auxílio de grande esforço mecânico.

O DNIT (2010) apresenta as faixas granulométricas necessárias para o emprego de materiais na construção de bases estabilizadas granulometricamente, representadas no Quadro 6, onde N é o número de operações dos eixos dos veículos, equivalentes às solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf durante a vida útil do pavimento.

Quadro 6 - Faixas de composição granulométrica para bases estabilizada

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

Fonte: DNIT (2010)

2.4.3 Estabilização química

Para a estabilização química de solos podem ser empregados materiais como cimento, cal ou materiais betuminosos. De acordo com o DNIT (2006), o cimento Portland e a cal hidráulica têm como principal propriedade, apresentar fenômenos de pega e endurecimento devido ao contato com a água.

De acordo com Balbo (2007), a adição dos aglomerantes hidráulicos não tem por função apresentar ganho na resistência a compressão, mas sim dar estabilidade

de forma que se torne menos expansivo. Dentre os tipos de misturas com estabilização química, o autor destaca algumas soluções como:

Brita graduada tratada com cimento (BGTC): Mistura de agregados britados do tipo BGS, com quantidades de 3% a 4% de cimento Portland, em peso da mistura total;

Solo melhorado com cimento (SMC): Material resultante da mistura de solo natural com cimento, em quantidade inferior a 7% em massa.

Solo-cimento (SC): Mistura de solo com cimento Portland, com teor de cimento Portland superior a 7% em massa.

Solo-cal (SCA): Misturas de solos expansivos, geralmente solos argilosos, com cal hidratada.

2.5 Utilização do pó de brita na pavimentação

O pó de brita é um dos materiais presentes na composição da brita graduada simples, juntamente com outras granulometrias de materiais britados. Além da aplicação nas camadas inferiores do pavimento, o pó de brita é utilizado na produção do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Além de ser utilizado como agregado em micro revestimento asfáltico a frio e na lama asfáltica (BERNUCCI *et al.* 2008).

Costa *et al.* (2019), avaliaram a mistura de um solo classificado como A2 – 6 (Pedregulhos ou areias siltosos ou argilosos) pelo sistema TRB, com adições de 15 e 25% de pó de brita em relação a massa total, concluiu-se que a adição do pó de brita neste tipo de solo aumentava a expansão e reduzia o ISC, resultado insatisfatório para a utilização em pavimentos.

Pereira *et al.* (2021) verificou que em misturas com um solo argiloso da região do Distrito Federal, a mistura de 20% de pó brita e 80% solo, apresentou valores de ISC inferiores a amostra composta puramente por solo, entretanto, as amostras com 30 e 40% de pó de brita, o ISC apresentou resultado superior à amostra de solo puro, além da redução da expansibilidade.

Araújo (2019) analisou o comportamento mecânico de misturas de um solo tipicamente arenoso com adições de resíduos de brita calcária, na região de Mossoró-RN. Em sua análise, a mistura composta por 50% do resíduo da britagem, atingiu ISC 73,49%, valores satisfatórios para utilização em camadas de sub-base, de acordo com a norma do DNIT 139/10 – ES.

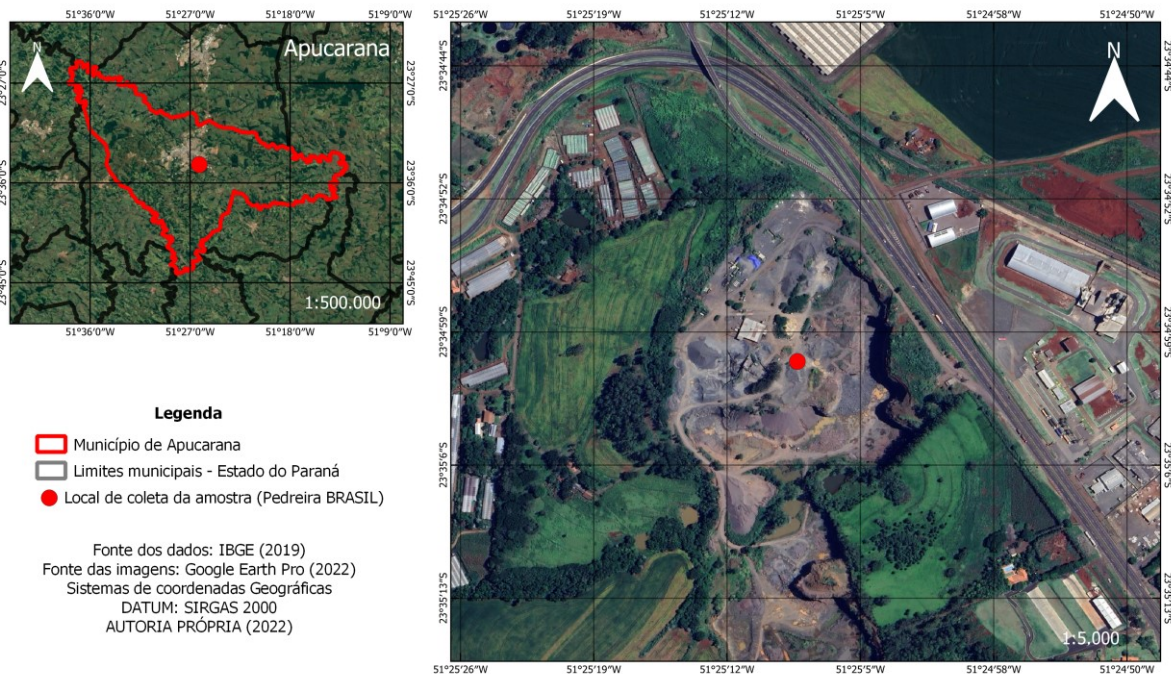
3 MATERIAIS E MÉTODOS

No capítulo materiais e métodos serão apresentados os materiais utilizados e os procedimentos realizados para a avaliação da estabilização granulométrica de um solo argiloso através da adição de pó de brita em diferentes proporções, além da caracterização do solo, determinação dos limites de consistência, expansibilidade e índice de suporte Califórnia. No desenvolvimento desta pesquisa os ensaios foram realizados em 2 laboratórios distintos, os ensaios de caracterização física foram realizados no laboratório de geotecnia da UTFPR – Campus Apucarana, já os ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia foram realizados no laboratório de solos da Politécnica Engenharia.

3.1 Coleta dos materiais

A coleta de materiais foi realizada na Pedreira Brasil na qual foi obtida prévia autorização para coleta de solo e pó de brita. A pedreira está situada às margens da BR-376 – Rodovia do café – Km 05, no município de Apucarana – PR, conforme Figura 8.

Figura 8 - Local de retirada das amostras



Fonte: Google Earth Pro (2021)

A escolha da jazida para coleta do solo se deu pelos resultados obtidos por Oliveira (2021), que ao avaliar o desempenho mecânico do solo da jazida, obteve

valores de ISC para o solo de 10,43% e expansão de 1,95%, valores insatisfatórios para o emprego do solo da jazida em camadas de bases ou sub-bases de pavimentos.

As amostras deformadas de solo foram coletadas na jazida de empréstimo próximo a superfície, como mostra a Figura 9, no qual fora retirado apenas a camada de material orgânico respeitando os procedimentos da NBR 9604: *Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas* (ABNT, 2016c). Para coleta foram utilizadas pás, picareta, enxadão e sacos plásticos para coleta do solo, inicialmente foram coletados 60kg de solo para realização dos ensaios de caracterização, compactação e ISC.

Figura 9 - Local da coleta das amostras deformadas de solo



Fonte: Autoria Própria (2022)

As amostras de pó de brita foram coletadas na base da pilha de britagem com o auxílio de pás e armazenados em sacos plásticos, conforme Figura 10, totalizando 40kg de material. Posterior a coleta, as amostras foram transportadas até o laboratório para realização de ensaios de compactação, ISC e caracterização.

Figura 10 - Local de coleta do pó de brita



Fonte: Autoria Própria (2022)

3.2 Ensaios de caracterização

Este tópico apresenta os procedimentos dos ensaios necessários para a caracterização das amostras de solo coletado, onde são descritos os procedimentos adotados nos ensaios realizados em laboratório para avaliar a distribuição granulométrica do solo, massa específica e consistência do solo.

3.2.1 Preparo das amostras

Para a realização dos ensaios de caracterização e compactação, as amostras foram preparadas seguindo os procedimentos descritos na NBR 6457: *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização* (ABNT, 2016a), com secagem prévia da amostra ao ar até a umidade higroscópica, posteriormente a amostra foi destorroada. A Figura 11 apresenta em (a) as amostras de solo antes do processo de secagem e em (b) após a secagem até a umidade higroscópica e destorroada.

Figura 11 - Amostras de solo (a) após a coleta (b) seca e destorroada



(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria (2022)

Para os ensaios de análise granulométrica, foi tomada uma amostra de 1kg, conforme avaliação visual de que os maiores grãos eram inferiores a 5mm.

Para os ensaios de limites de liquidez e plasticidade, foram tomadas amostras de 200g de solo passantes na peneira de 0,42mm (N°40).

Para o ensaio de determinação da massa específica dos grãos de solo, foi separada uma amostra de 500g de solo passante na peneira de 4,8mm (N° 4).

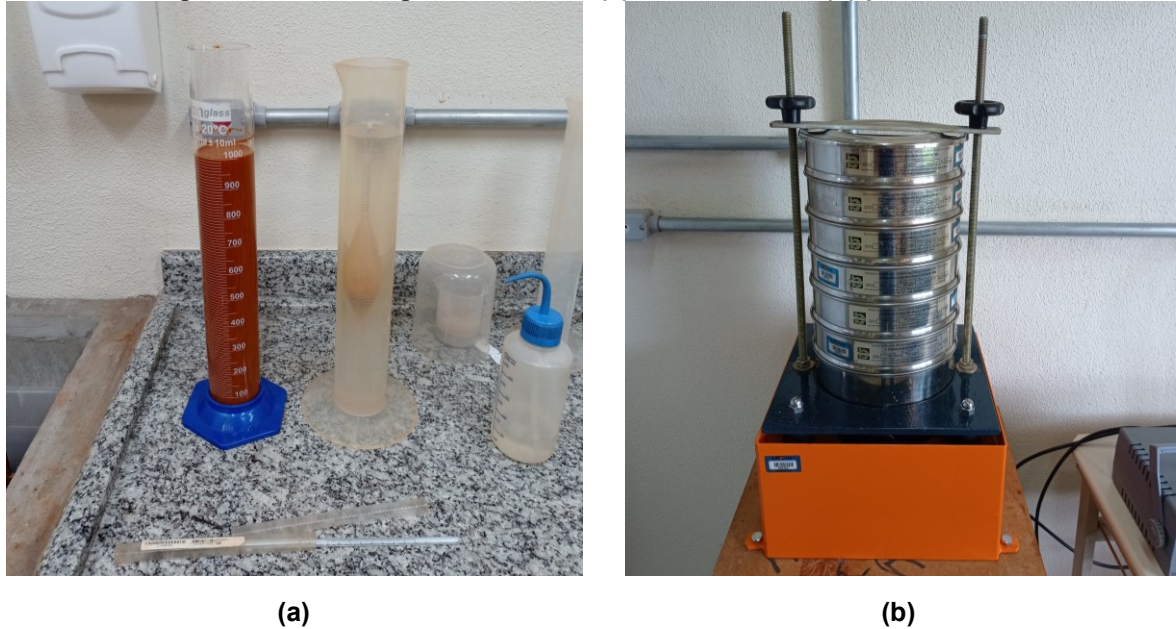
3.2.2 Análise granulométrica conjunta

Para a obtenção da curva granulométrica do solo, foi realizado o ensaio de análise granulométrica conjunta adotando os procedimentos propostos pela NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica* (ABNT, 2018), a curva granulométrica foi obtida após combinação dos resultados ensaios de peneiramento e sedimentação.

Para realização da análise granulométrica, optou-se pela utilização de defloculante no solo devido à grande presença de finos no solo coletado, sendo que a solução defloculante utilizada foi a de Hexametáfosfato de Sódio. Após a leituras com o densímetro, o material foi transferido para a peneira N° 200 (0,075mm) onde foi realizada lavagem de baixa pressão e levado para secagem em estufa.

Posteriormente realizou-se o peneiramento grosso e fino com auxílio do conjunto de peneiras. A Figura 12 apresenta as 2 etapas da análise granulométrica conjunta, divididas em (a) sedimentação e (b) peneiramento.

Figura 12 - Análise granulométrica (a) sedimentação (b) peneiramento



(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria (2022)

3.2.3 Análise granulométrica por peneiramento

Para a caracterização do pó de brita, foram realizados ensaios para determinação da composição granulométrica, através de peneiramento, seguindo os procedimentos indicados pela NBR NM 248 – *Agregados – Determinação da composição granulométrica* (ABNT, 2003). Para realização do ensaio, a amostra de pó de brita foi seca previamente e posteriormente realizou-se o peneiramento do material utilizando as peneiras da série normal indicadas no tópico 3.1 da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.2.4 Limite de liquidez

Para determinação do limite de liquidez do solo, foram realizados os procedimentos descritos na NBR 6459: *Solo – Determinação do limite de liquidez* (ABNT, 2017b). O ensaio foi realizado utilizando o aparelho de Casagrande, onde o solo foi moldado até que a espessura atingisse 10 mm, foi aberta uma ranhura com o cinzel, aplicou-se golpes até que fosse obtido junção na ordem de 13 mm na ranhura,

e por último determinação da umidade do material da junção. A Figura 13 mostra parte do ensaio de limite de liquidez sendo realizado.

Figura 13 - Ensaio de limite de liquidez



Fonte: Autoria Própria (2022)

3.2.5 Limite de plasticidade

O ensaio para determinação do limite de plasticidade foi executado seguindo os procedimentos apresentados pela NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade* (ABNT, 2016b). O ensaio consiste em moldar um cilindro de aproximadamente 3mm de espessura e 100mm de comprimento (semelhante ao gabarito) sobre a placa de vidro a partir da mistura de solo e água destilada, como apresentado na Figura 14. Após a moldagem do cilindro, as amostras foram pesadas e colocadas em cápsulas levadas à estufa para determinação do teor de umidade.

Figura 14 - Ensaio de limite de plasticidade



Fonte: Autoria Própria (2022)

3.2.6 Massa específica dos sólidos

Para a determinação da massa específica dos sólidos, foram seguidos os procedimentos presentes no Anexo B – *Grãos de solos que passam na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica* da NBR 6458: *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa aparente e da absorção de água* (ABNT, 2017c). Primeiramente foi aplicado vácuo de -12kPa com a utilização do picnômetro e a bomba a vácuo, em seguida foi aplicada variação de temperatura com água gelada e água quente e por fim fez-se leitura de diversas temperaturas ao longo do dia juntamente com a pesagem da massa de sólidos, água e picnômetro. O ensaio foi realizado tanto para o solo puro quanto para o pó de brita utilizado nesse estudo, como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Ensaio de determinação da massa específica dos sólidos

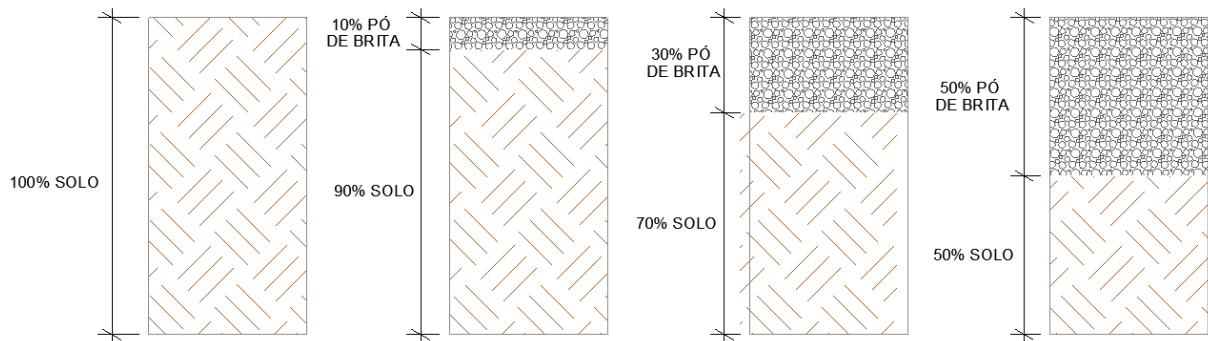


Fonte: Autoria Própria (2022)

3.3 Composição das misturas

Embasado no estudo apresentado por Pereira *et al.* (2021), foram definidas quatro composições distintas para a avaliação do comportamento mecânico das misturas, uma composta por solo puro, e três amostras de solo com proporções de 10, 30 e 50% da massa total de adição de pó de brita, conforme apresentado na Figura 16. Os valores de em massa das misturas correspondem à massa das amostras secas até a umidade higroscópica.

Figura 16 - Composição das misturas



Fonte: Autoria Própria (2021)

De modo a facilitar a interpretação dos resultados e visualização dos gráficos, as amostras foram nomeadas de acordo com suas respectivas concentrações de pó de brita incorporado, as nomenclaturas são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 - Nomenclatura das misturas

Descrição	Nomenclatura
Solo natural	S.N.
Solo com 10% de pó de brita	PDB10
Solo com 30% de pó de brita	PDB30
Solo com 50% de pó de brita	PDB50

Fonte: Autoria Própria (2022)

3.4 Ensaios mecânicos

Para avaliar a possibilidade do uso das misturas em camadas de base ou sub-base, foram realizados os ensaios de compactação e índice de suporte Califórnia. Para a realização do ensaio de ISC, foram moldados 5 corpos de prova para cada amostra, variando a umidade, conforme ensaio de compactação. Os ensaios de ISC e compactação foram realizados no laboratório de solos e materiais da Politécnica Engenharia.

3.4.1 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados para a amostra de solo puro e para as misturas de solo e pó de brita. Para o ensaio, foi realizado o preparo da amostra previamente conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016a), com secagem da amostra ao ar até a umidade higroscópica e destorroado.

A realização do ensaio de compactação se deu conforme as diretrizes da NBR 7182 (ABNT, 2020) com o procedimento sem o reuso do material, pois com os corpos de prova moldado através do ensaio de compactação foram realizados os ensaios de ISC.

A energia de compactação empregada no ensaio foi a intermediária, conforme determinado na norma DNIT 139/2010 – ES: *Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço* (DNIT, 2010b) que especifica que para sub-bases estabilizadas granulometricamente, deve ser empregada energia intermediária ou superior nos ensaios de compactação e ISC.

3.4.2 Índice Suporte Califórnia (ISC-CBR)

A moldagem dos corpos de prova do ensaio de ISC foi realizado juntamente com o ensaio de compactação, onde os corpos de prova utilizados para determinação da massa específica máxima seca e umidade ótima foram submersos em água durante 4 dias para mensurar a expansibilidade do solo e posteriormente levados a prensa para determinação do ISC, conforme os procedimentos apresentados pela NBR 9895 (ABNT, 2017a).

Ao total foram moldados e ensaiados 20 corpos de prova para comparação dos valores de ISC variando a umidade e o teor de incorporação de pó de brita ao solo.

Após os ensaios de compactação, foram posicionados os relógios comparadores e as amostras submersas em água, onde foram monitoradas as expansões a cada 24h conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Etapa de expansão do ensaio de ISC



Fonte: Autoria Própria (2022)

Após o monitoramento da expansão dos corpos de prova, os cilindros foram retirados do recipiente com água para escorrer a água por 15 minutos e posteriormente levados à prensa para realização da penetração, apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Penetração no ensaio de ISC



Fonte: Autoria Própria (2022)

No ensaio de ISC, são medidos os deslocamentos no deflectômetro presente no anel dinamométrico, que quando multiplicados pela constante (K) do equipamento, resultam na força aplicada através da área do pistão.

O ISC calculado para cada corpo de prova através da relação entre a pressão calculada ou corrigida pela pressão padrão, e o valor adotado é o maior valor entre as pressões obtidos nas penetrações de 2,54 e 5,08mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo 3 foram apresentados os experimentos que compõem essa pesquisa, neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios e a discussão sobre os mesmos.

4.1 Caracterização do Solo

Os valores de massa específica dos sólidos, limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade obtidos a partir dos procedimentos descritos no Capítulo 3, estão reunidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização do solo

Ensaio de caracterização do solo	Unidade	Valor obtido
Limite de Liquidez	%	55
Limite de Plasticidade	%	41
Índice de Plasticidade	%	14
Massa Específica dos sólidos	g/cm ³	3,008

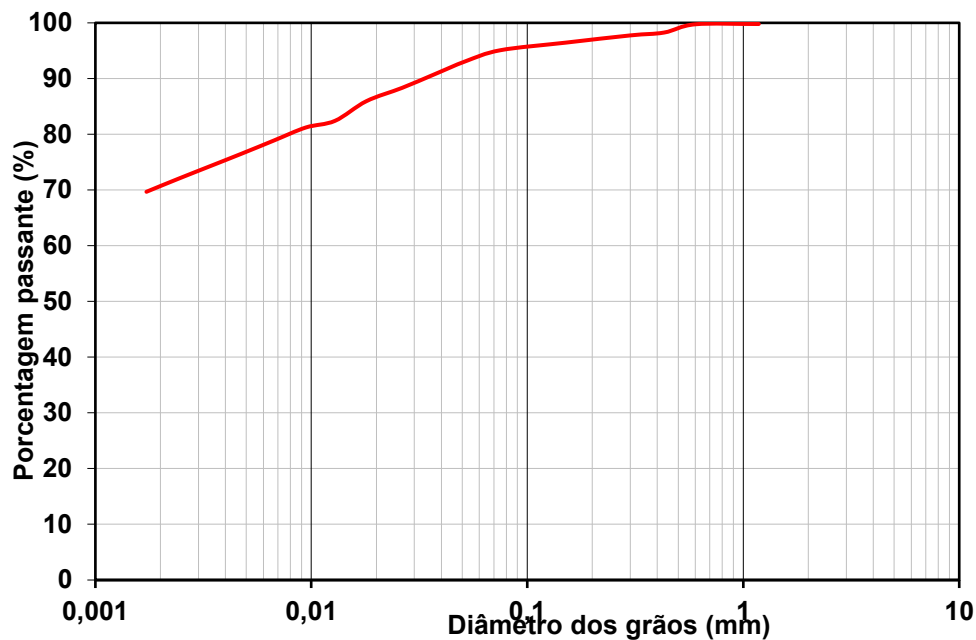
Fonte: Autoria Própria (2022)

Oliveira (2021) e Scomparin (2021) coletaram amostras deformadas de solo na Pedreira Brasil no município de Apucarana, mesmo local de coleta das amostras do estudo em questão. Oliveira (2021) obteve valores de LL, LP e IP de 57, 42 e 15%, respectivamente, enquanto Scomparin (2021) obteve valores de LL, LP e IP de 50, 42 e 8%, respectivamente. Constata-se que os valores obtidos nesse trabalho são aproximados aos obtidos pelos autores citados, resultado esperado, visto que o local de coleta foi semelhante.

Quanto a massa específica dos sólidos, Oliveira (2021) obteve valor de 3,147 g/cm³ enquanto Scomparin (2021) obteve valor de 2,985 g/cm³. Constata-se novamente proximidade entre os valores obtidos nesse trabalho e os trabalhos dos autores citados.

A partir dos procedimentos descritos pelo item 3.2.2, foi possível obter a curva de distribuição granulométrica do solo. O Gráfico 1 apresenta a curva obtida.

Gráfico 1 – Curva granulométrica do solo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Com a curva granulométrica, realizou-se a análise de composição textural do solo, sendo realizada a divisão entre pedregulho, areia grossa, areia média, areia fina, silte e argila, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados Análise Granulométrica Conjunta

Frações	Porcentagem
Argila ($\varnothing < 0,002$ mm)	70,40
Silte ($0,002 < \varnothing < 0,06$ mm)	23,60
Areia Fina ($0,06 < \varnothing < 0,2$ mm)	2,80
Areia Média ($0,2 < \varnothing < 0,6$ mm)	2,94
Areia Grossa ($0,6 < \varnothing < 2$ mm)	0,26
Pedregulho ($2 < \varnothing < 60$ mm)	0,00

Fonte: Autoria Própria (2022)

Por fim, através da obtenção dos valores de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Análise Granulométrica foi realizada a classificação do solo pelos métodos SUCS (Sistema de Classificação Unificado dos Solos) e T.R.B (Transportation Research Board). O solo em estudo pode ser classificado como MH (silte elástico) pelo SUCS e A-7-5(10) pelo T.R.B. Com os resultados obtidos nas classificações dos solos, baseados nos valores prováveis para cada tipo de solo apresentados pelo Quadro 3 e Quadro 5 confirmam que o solo não é adequado para uso em pavimentos.

4.2 Caracterização do Pó de Brita

Com a realização do ensaio para determinação da curva granulométrica do pó de brita, obteve-se os valores apresentados na Tabela 5.

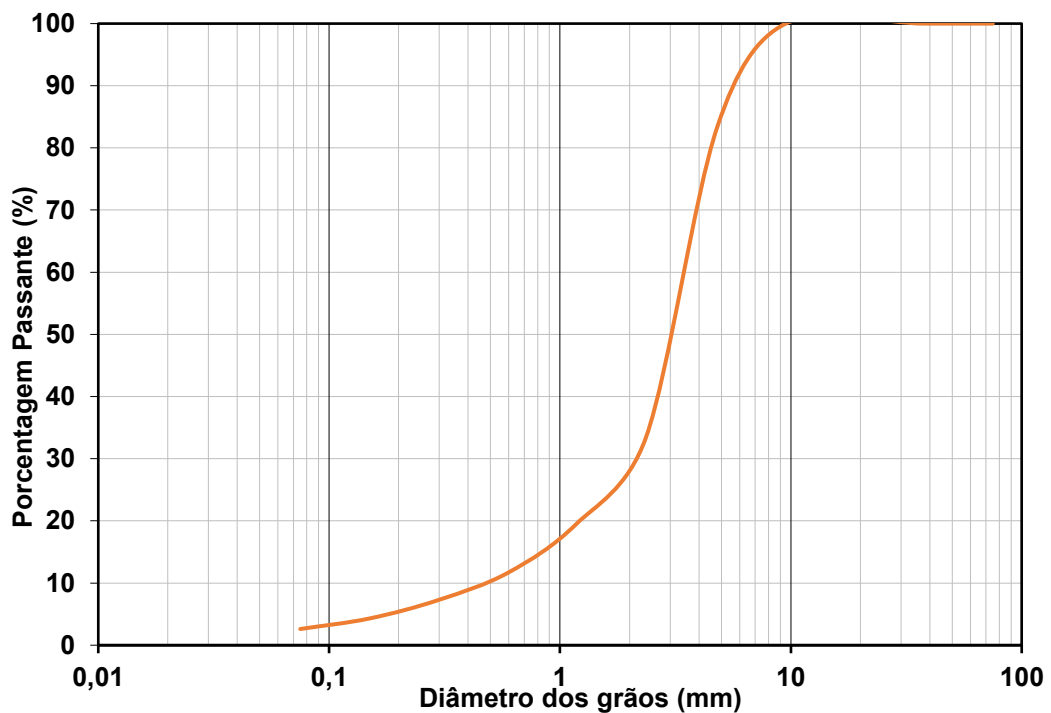
Tabela 5 - Resultados da análise granulométrica do agregado

Diâmetro das partículas (mm)	% Passante
75	100
37,5	100
19	100
9,5	100
4,75	83
2,36	33
1,18	20
0,60	12
0,30	7
0,15	4
0,075	3

Fonte: Aatoria Própria (2022)

Com os resultados obtidos através do peneiramento, traçou-se a curva granulométrica apresentada no Gráfico 2. Analisando o formato da curva granulométrica, percebe-se que o pó de brita possui uma graduação densa para as partículas entre 4,75 e 2,36mm.

Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do pó de brita



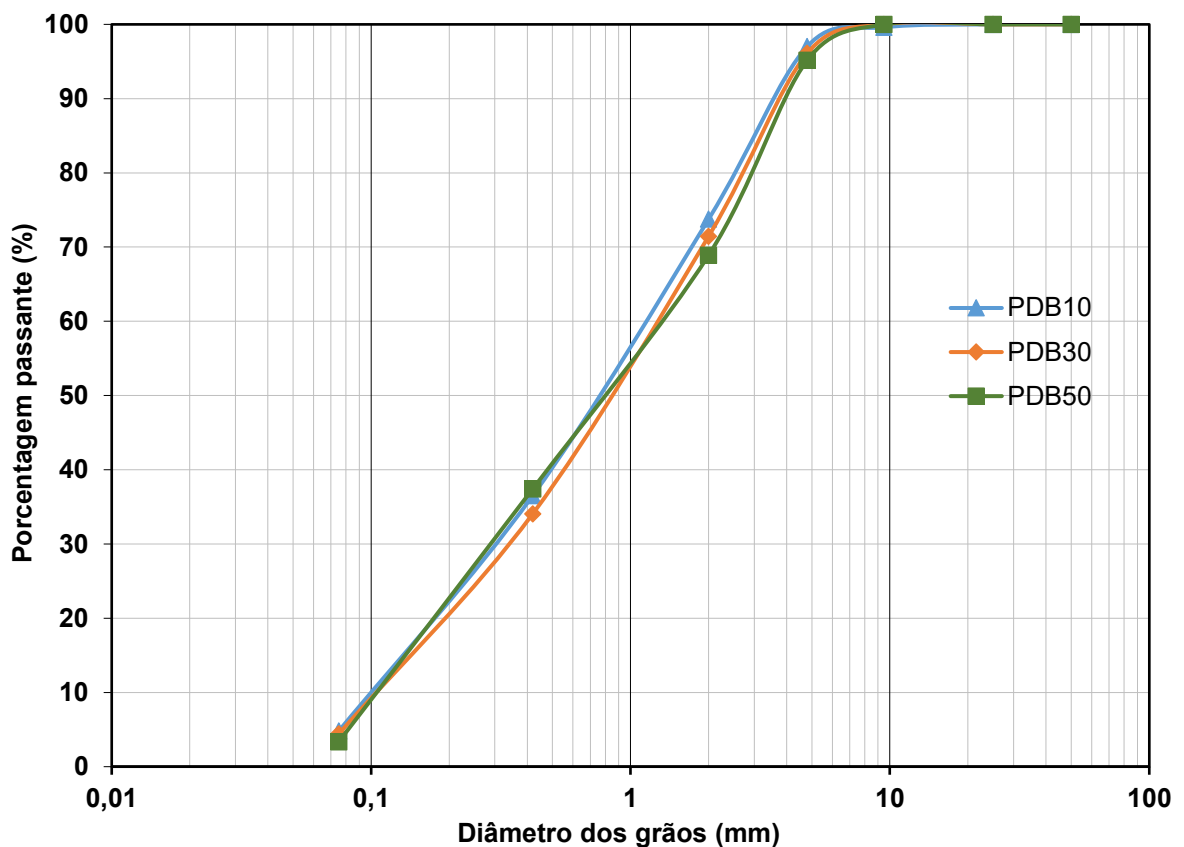
Fonte: Aatoria Própria (2022)

Assim como o solo, o ensaio para determinação da massa específica dos sólidos foi realizado para o pó de brita, onde obteve-se $2,998\text{g/cm}^3$, valor superior aos $2,789\text{g/cm}^3$ encontrado por Menossi (2004) obtidos na caracterização do pó de brita basáltica.

4.3 Composição das misturas

Após a preparação das misturas de solo, as amostras foram submetidas ao ensaio para determinação das faixas granulométricas, conforme a norma DNIT 141/2010 – ES: *Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço*. Após a realização do ensaio, foi possível traçar a curva de distribuição granulométrica das misturas, conforme apresentado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Distribuição granulométrica das misturas



Fonte: Autoria Própria (2022)

Após a determinação das curvas granulométricas, foi realizada a comparação com as 6 faixas de apresentadas pelo DNIT para bases estabilizadas granulometricamente, assim como apresentados na Tabela 6

Tabela 6 - Faixas granulométricas das misturas

Peneiras	Limites (Faixa E)			% Retida		
	Superior	Inferior	Tolerância	PDB10	PDB30	PDB50
2"	100	100	7	100,0	100,0	100,0
1"	100	100	7	100,0	100,0	100,0
3/8"	100	100	7	99,6	100,0	100,0
N4	100	55	5	97,0	96,1	95,2
N10	100	40	5	73,8	71,4	68,9
N40	50	20	2	36,5	34,1	37,4
N200	20	6	2	4,8	4,4	3,4

Fonte: Autoria Própria (2022)

Para comparação das curvas granulométricas das misturas, a faixa E foi selecionada por ser a que mais se encaixou com os resultados obtidos. Ao avaliar os resultados obtidos apresentados na Tabela 6 com a Faixa E, percebe-se que a mistura composta por 50% de pó de brita não se encaixa na faixa granulométrica, o que a torna inadequada para sua utilização em base estabilizada granulometricamente. As demais misturas se encaixam na faixas E, de foram que por esse critério podem ser empregadas como base estabilizadas granulometricamente.

4.4 Compactação

A determinação das curvas de compactação se deu a partir a moldagem de 5 corpos de prova para cada amostra no ensaio de Proctor com energia intermediária, os valores umidade e massa específica seca obtidos no ensaio de compactação estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de massa específica máxima seca e umidade ótima obtidas no gráfico

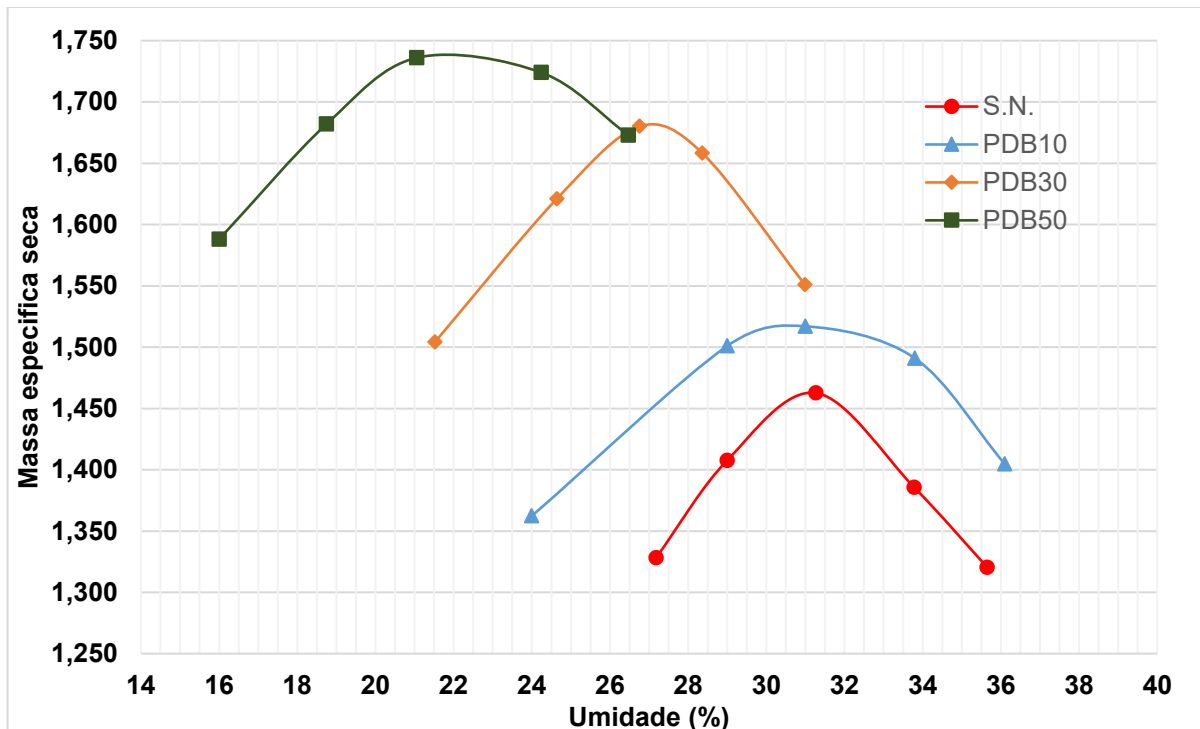
AMOSTRA	W_{ot}	$\rho_{d,max}$
S.N.	31,1	1,464
PDB10	30,50	1,520
PDB30	27,20	1,685
PDB50	21,50	1,738

Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir da amostra padrão, podemos perceber que, a adição do pó de brita no solo, as curvas de compactação se deslocam para cima e para esquerda, o que aumentou a massa específica seca e reduziu a umidade ótima. O aumento da massa específica seca se dá pela estabilização granulométrica realizada no solo. O Gráfico 4

apresenta as curvas de compactação da amostra de solo e das misturas com o pó de brita.

Gráfico 4 - Curvas de Compactação para as amostras



Fonte: Autoria Própria (2022)

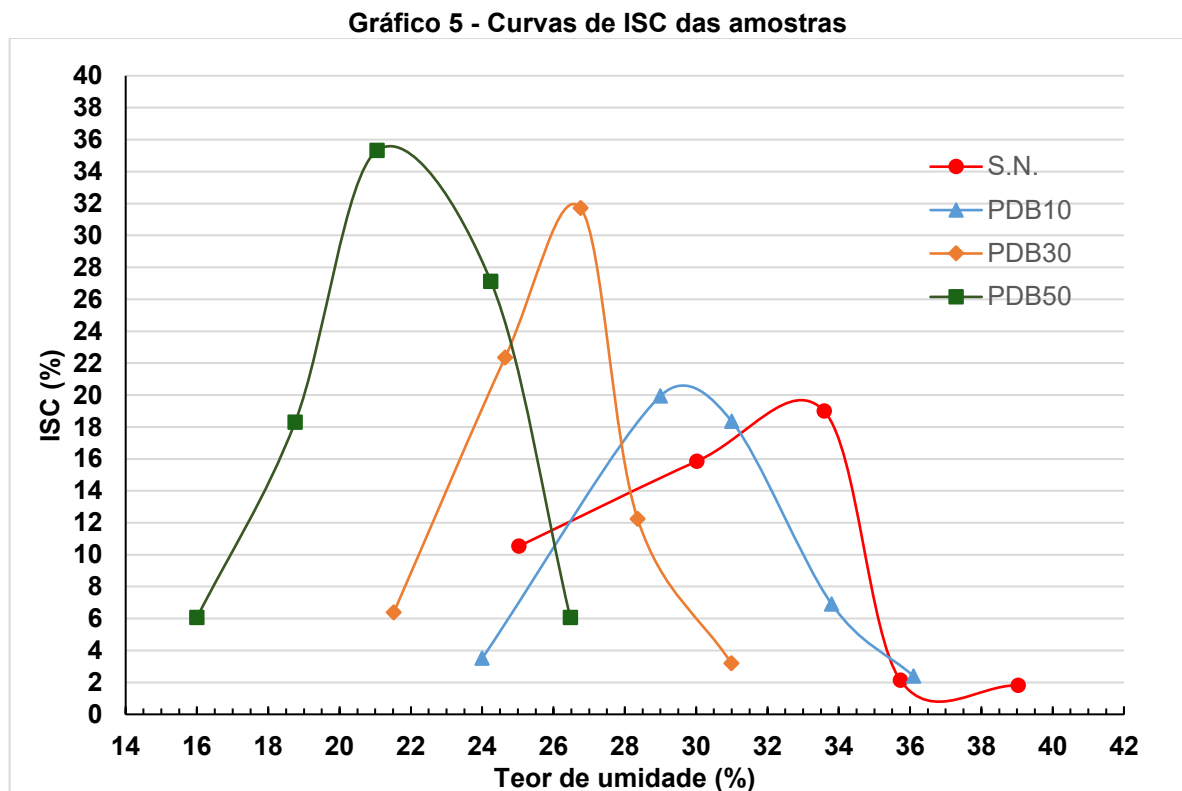
Como observado no Gráfico 4, para a amostra composta puramente por solo, obteve-se valores de umidade ótima de 31,1%, e massa específica seca de 1,464 g/cm³. Oliveira (2021) realizou ensaios de compactação com solo da mesma região e obteve umidade ótima de 34,9% e massa específica seca de 1,374 g/cm³. A diferença entre os valores obtidos é consequência da diferença entre energias de compactação empregada no ensaio.

A redução na umidade ótima para solos com incorporação de pó de brita também foi constatada por Costa *et al.* (2019), que obteve reduções de 7,7% da umidade ótima para mistura 15% de pó de brita e 17,9% para amostra com teor de pó de brita de 25%. Neste estudo, a redução da umidade foi de 1,9%, 12,5% e 30,9% para as amostras PDB10, PDB30 e PDB50 respectivamente.

4.5 Índice de Suporte Califórnia

Com objetivo de avaliar a resistência de carga do solo natural e das misturas incorporando pó de brita, realizou-se o ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC).

No Gráfico 5 pode-se perceber que com a incorporação de 10% no teor do pó de brita houve um aumento de 5,05% na capacidade de suporte. Com maiores incorporações de PDB a capacidade de suporte sofreu notório aumento, na amostra PDB30, o ISC obtido foi de 31,70%, aumento de 66,92% em relação a amostra padrão, já na amostra PDB50 o ISC superou em 85,99% a amostra S.N. atingindo ISC de 35,32%.



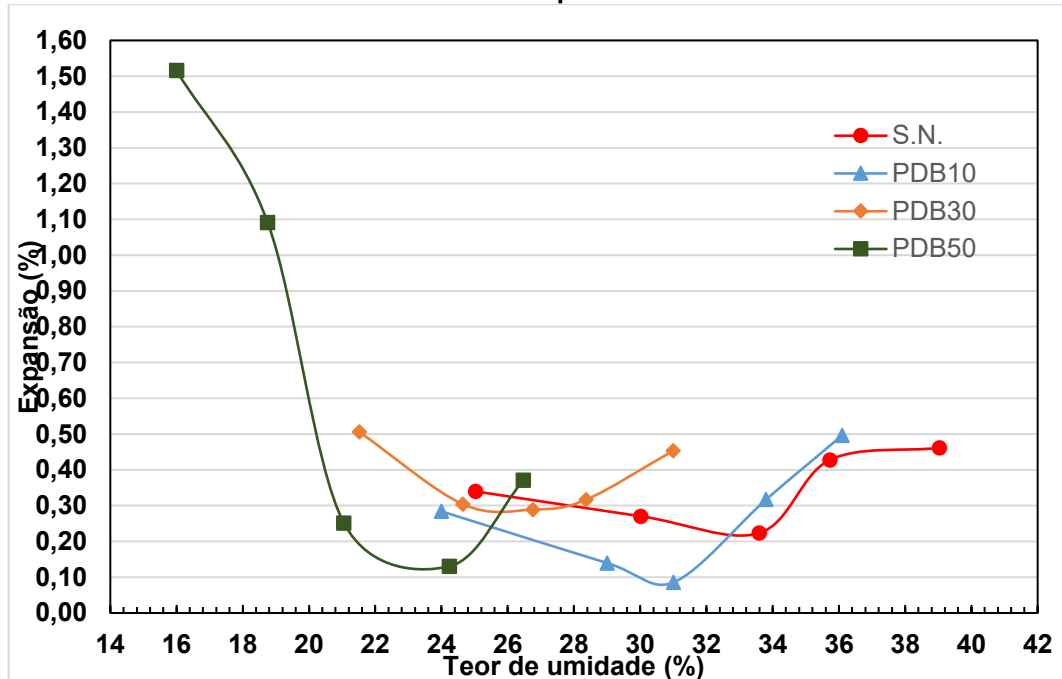
Fonte: Autoria Própria (2022)

O aumento no ISC gerado pela adição do pó de brita em solo argiloso foi percebido por Pereira *et al.* (2021), que obtiveram ISC de 17,8% para amostra de solo puro, e 30,0% para mistura composta por 40% de pó de brita e 60% de solo argiloso.

Na etapa de expansão do ensaio, a amostra PDB10 apresentou expansão de 0,09%, valor menor que a amostra padrão. Já as amostras PDB30 e PDB50 obtiveram

aumento na expansão em relação a amostra de solo puro, atingindo 0,29% e 0,25%, apresentando aumento em relação a amostra de solo natural.

Gráfico 6 - Curvas de expansão das amostras



Fonte: Autoria Própria (2022)

Comparando os resultados do ensaio de ISC com os critérios apresentados no Quadro 1, percebemos que as misturas PDB30 e PDB 50 podem ser utilizadas em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis, visto que atingiram $ISC \geq 20\%$ e expansão $\leq 1\%$. Já a amostra S.N. e PDB10 atingiram resultados suficientes apenas para o emprego em camadas de reforço de subleito, visto que possuem $ISC \leq 20\%$ e expansão $\leq 1\%$. As misturas ensaiadas não atingiram os requisitos mínimos de ISC para camadas de base, o que impossibilita seu emprego nesta camada. A Tabela 8 apresenta um resumo dos resultados obtidos no ensaio de Índice de Suporte California.

Tabela 8 - Resumo dos resultados do ensaio de ISC

AMOSTRA	ISC (%)	EXPANSÃO (%)
S.N.	18,99	0,22
PDB10	19,95	0,09
PDB30	31,70	0,29
PDB50	35,32	0,25

Fonte: Autoria Própria (2022)

5 CONCLUSÕES

O alto déficit de estradas pavimentadas no Brasil sem dúvidas é uma grande problemática para a infraestrutura de transportes do país. Como a infraestrutura das estradas depende diretamente das características mecânica dos solos presentes no local de sua construção, a presença de solos com baixa capacidade de suporte é um fator técnico que gera maiores custos para construção de novas estradas, devido a necessidade de sua total retirada ou tratamento.

O presente trabalho apresentou uma alternativa para o tratamento do solo com baixa capacidade de suporte, encontrado em jazida no município de Apucarana – PR através de uma estabilização granulométrica com pó de brita, coletado em uma pedreira do município.

No ensaio de análise granulométrica, constatou-se que o solo selecionado possui 70,4% das partículas inferiores a 0,02mm (argila). Já o pó de brita, possui 63% das partículas com diâmetro maior que 2,36mm. Com os resultados obtidos na caracterização do solo, foi possível caracterizado o solo de acordo com os sistemas de classificação SUCS e TRB.

Nos ensaios de compactação, foi possível determinar a massa específica seca do solo e das misturas, assim foi possível perceber que com a adição do pó de brita, obteve-se redução da umidade ótima e aumento na massa específica seca.

Dos ensaios de ISC, foram determinadas as resistências a penetração no solo e nas misturas, além de suas expansões. Na amostra com 30% de pó de brita foram obtidos valores de ISC de 31,7% e 0,29% de expansão. Já na amostra com 50% de incorporação de pó de brita, ISC de 35,3% e expansão de 0,25%. Com os resultados obtidos, conclui-se que ambas as amostras podem ser empregadas em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis. Já as amostras de solo natural e 10% de pó de brita, atendem apenas aos requisitos de camadas de reforço de subleito.

De modo a possibilitar a continuidade da pesquisa realizada, ou embasar pesquisas na área, algumas propostas para trabalhos futuros são:

- Realizar o comparativo de custos entre a construção da sub-base de uma estrada da região de Apucarana, e a construção da sub-base dimensionada com as misturas de solo e pó de brita;

- Avaliar a substituição parcial do pó de brita por pequenos teores de cimento Portland, através de uma estabilização química e granulométrica;
- Empregar os mesmos teores de pó de brita para solos com classificações e propriedades geotécnicas diferentes das do solo estudado.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. G. L. **Estudo do comportamento mecânico de solo estabilizado com resíduo de britagem de rocha calcária para emprego de camadas de pavimento**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 6457**: Amostras de Solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016b.

_____. **NBR 9604**: Aberturas de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento. Rio de Janeiro, 2016c.

_____. **NBR 9895**: Solo — Índice de suporte Califórnia (ISC) — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2017a.

_____. **NBR 6459**: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017b.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulhos retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017c.

_____. **NBR 7181**: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 7182**: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020.

AT&M TECNOLOGIA. **Movimentação de cargas registra alta de 38,63% no primeiro quadrimestre de 2021**. 2021. Disponível em: <https://blog.atmtec.com.br/2021/06/25/movimentacao-de-cargas-registra-alta-de-3863-no-primeiro-quadrimestre-de-2021/>. Acesso em: 02 dez. 2021.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2008.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: Fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc Editora, 1988.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do Transporte: estatísticas consolidadas**. 2018. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2018/>. Acesso em: 02 dez. 2021.

_____. **Investimento realizado em infraestrutura de transporte no Brasil vem caindo, mostra levantamento da CNT**. 2021. Disponível em:

<https://cnt.org.br/agencia-cnt/investimento-transporte-vem-caindo>. Acesso em: 02 dez. 2021.

COSTA, A. **Heráclito**: fragmentos contextualizados. Rio de Janeiro: Odysseus Editora Ltda, 2012.

COSTA, A. F. T. de H. S. *et al.* Análise da adição de pó de brita no melhoramento de um solo, com vistas à pavimentação. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**, v. 3, n. 3, p. 75-86, 5. dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.17564/2359-4942.2019v3n3p75-86>.

DAS, B. M. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DAS, B. M. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**. 9. ed. São Paulo: cengage learning, 2019.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Projeto de pavimentação**. 1. ed. São Paulo: DER, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNER, 1981.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

_____. **DNIT 141**: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2010a.

_____. **DNIT 139**: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2010b.

_____. **DNIT 172/2016 - ME**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2016.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários**: estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

GOOGLE LLC. **Google Earth Pro**, 2021.

JAWORSKI, T. **Equipamentos para escavação – Compactação e transporte**. 1. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1997.

LEÃO, M. F. **Fundamentos da mecânica dos solos**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de Geotecnia**. 2, ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MENOSSEI, Rômulo Tadeu. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos Solos – Ensaio de Laboratório**. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1995.

OLIVEIRA, R. C. S. **Caracterização e avaliação do desempenho mecânico de um solo tratado com lama proveniente do beneficiamento de vidro visando sua aplicação para fins de pavimentação**. 2021. 121p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2021.

PEREIRA, C. H. de A. F. *et al.* Viabilidade técnica do uso de agregados RCC em obras de pavimentação no Distrito Federal. In: **QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL**, 1., 2021, Guarujá. Capítulo de Livro. Científica Digital, 2021, Cap. 8., p. 112-122.

PESSOA JÚNIOR, E. **Manual de obras rodoviárias e pavimentação urbana: execução e fiscalização**. São Paulo: Pini, 2014.

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

SALOMÃO, P. E. A.; PEREIRA, R. M.; CARVALHO, P. H. V. de; RIBEIRO, P. T. The importance of conservation services on paved roads. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 8, n. 8, p. e16881189, 2019. DOI: 10.33448/rsd-v8i8.1189. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/1189>. Acesso em: 2 dec. 2021.

SCOMPARIN, D. S. **Análise paramétrica de estabilidade de taludes compostos por solo compactado**. 2021. 85 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - (em desenvolvimento) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2021.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008.

VILLIBOR, D. F. **Estabilização granulométrica ou mecânica**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1978.