

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Júlia Lenzi Cardoso

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA
BGTC E IMPACTO NO DIMENSIONAMENTO
MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Porto Alegre
Fevereiro de 2024

JÚLIA LENZI CARDOSO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA
BGTC E IMPACTO NO DIMENSIONAMENTO
MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Thaís Radünz Kleinert
Co-orientadora: Helena Lunkes Strieder

Porto Alegre
Fevereiro de 2024

JÚLIA LENZI CARDOSO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA
BGTC E IMPACTO NO DIMENSIONAMENTO
MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora, pela Professora Co-orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de fevereiro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Thaís Radünz Kleinert (UFRGS)
Dr.^a pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Prof.^a Helena Lunkes Strieder (UFRGS)
M.^a pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Co-orientadora

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Mario Alexander Castañeda López
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Flávia e Antônio, por sempre acreditarem em mim e no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço às minhas orientadoras, Thaís Radünz Kleinert e Helena Lunkes Strieder, por sempre estarem disponíveis e dedicarem um tempo ao meu trabalho, os conselhos, sugestões e insights nos momentos mais desafiadores e pelos momentos de incentivo quando eu mais duvidei de mim e do meu potencial. Suas críticas e direcionamentos me ajudaram a crescer como pesquisadora.

Agradeço também aos professores Washington Peres Núñez e Mario Alexander Castañeda López por suas valiosas contribuições durante a análise de dados deste trabalho. Sem este apoio, talvez alguns obstáculos não tivessem sido superados.

Aos meus pais Flávia e Antônio, expresso minha gratidão pela compreensão, incentivo e apoio incondicional. Seu suporte emocional e financeiro foi essencial para superar os desafios e manter-me focada nos meus objetivos. Aos meus irmãos, João Victor e Arthur, obrigada por me ajudarem a desopilar, quando necessário.

Ao longo de toda a minha graduação, tive apoio de alguns amigos que levarei para sempre comigo. Agradeço em especial à Mariana Oliveira, Fernanda Abreu, Eduarda Winck, Pietro Meltzer e Gianluca Borges pelas trocas de experiências, colaborações em projetos e amizades construídas ao longo desses anos. Compartilhar esse período com vocês tornou a jornada acadêmica ainda mais leve.

Agradeço aos bolsistas, técnicos e pesquisadores do LAPAV que me ajudaram de diferentes formas na realização deste trabalho: Afonso Stefanon, Fernanda Ramires, Giordano Reis, Igor Cruz, Katlin Modesto, Larissa Guerra e Lívia Oliveira, e ao Márcio Ribeiro. Obrigada a todos pelo auxílio na realização de ensaios, pela disponibilidade, pela companhia e pelas ideias compartilhadas. E um agradecimento especial ao Leonardo Lunkes Wagner, por sempre estar disponível para tirar minhas dúvidas laboratoriais, mesmo que pequenas.

Agradeço à equipe do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), em especial à professora Vanessa Pasa Dutra, e ao técnico Edgar Lucas, por disponibilizarem as dependências do laboratório para minhas vigotas.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho e para o meu crescimento acadêmico. Cada palavra de incentivo, conselho e colaboração foi significativa.

Queremos ter certezas e não dúvidas, resultados e não experiências, mas nem mesmo percebemos que as certezas só podem surgir através das dúvidas e os resultados somente através das experiências

Carl Jung

RESUMO

CARDOSO, J. L. Estudo do comportamento mecânico de uma BGTC e impacto no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos. 2024. 44 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) tem sido amplamente empregada na construção de pavimentos semirrígidos para enfrentar o aumento do tráfego e das cargas por eixo. Contudo, no contexto brasileiro, são escassos os estudos que abordam a influência desses fatores na resistência e, especialmente, na rigidez dessas composições. Este trabalho teve como objetivo o estudo do comportamento mecânico deste material, a fim de realizar um posterior dimensionamento mecanístico-empírico, comparando comportamentos elásticos. Após a definição dos teores de 3 e 6%, foram moldados corpos de prova para os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão simples. Todos os corpos de prova foram rompidos aos 28 dias de cura. A partir dos ensaios de RTF, foi possível obter os resultados para o módulo de elasticidade na flexão (MEF) e deformação de ruptura na flexão. Os resultados de RTF e de RCS demonstraram um aumento na resistência da mistura, conforme o acréscimo do teor de cimento. Ainda, os valores obtidos para a RCS permitiram configurar a mistura analisada como sendo um concreto magro. A partir dos resultados obtidos na etapa laboratorial, foi possível realizar o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos utilizando camadas de base e sub-base de BGTC. O estudo ressalta a influência significativa da escolha entre estas duas estruturas para o dimensionamento de pavimentos asfálticos. A seleção adequada da estrutura é crucial para considerar as características específicas da estrutura em análise, bem como atender às demandas de segurança e desempenho. Observou-se que as camadas de base convergiram para um único mecanismo de degradação, sendo este a vida de fadiga efetiva da camada cimentada, com valores para o $N_{\text{crítico}}$ muito próximos entre si. Em paralelo, para as camadas de sub-base, a análise dos dados também convergiu para um mesmo mecanismo de degradação, porém sendo a vida de fadiga da camada de concreto asfáltico. No entanto, apesar desse comportamento unificado, uma disparidade nos valores do $N_{\text{crítico}}$ foi observada para a camada de sub-base, apresentando um coeficiente de variação de 73% entre as estruturas analisadas. Em resumo, o estudo enfatiza a necessidade de uma análise abrangente ao selecionar o tipo de estrutura para o dimensionamento de pavimentos asfálticos, considerando não apenas as propriedades dos materiais, mas também o comportamento esperado da estrutura como um todo.

Palavras-chave: brita graduada tratada com cimento, comportamento mecânico, resistência à tração na flexão, dimensionamento mecanístico-empírico.

ABSTRACT

CARDOSO, J. L. Study of the mechanical behavior of a CTCS and impact on the mechanistic-empirical asphalt pavement design. 2024. 44 p. Diploma Work (Degree in Civil Engineering) – Department of Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The cement-treated crushed stone (CTCS) has been widely employed in the construction of semi-rigid pavements to cope with increased traffic and axle loads. However, in the Brazilian context, studies addressing the influence of these factors on the strength and, especially, the stiffness of these compositions are scarce. This study aimed to investigate the mechanical behavior of this material to subsequently perform mechanistic-empirical design, comparing elastic behaviors. After defining the contents of 3% and 6% contents, specimens were molded for flexural tensile strength and unconfined compressive strength tests. All specimens were broken after 28 days of curing. From the flexural tensile strength tests, results for flexural modulus of elasticity (FME) and flexural strain at break were obtained. The FTS and UCS results demonstrated an increase in mixture strength with increasing cement content. Additionally, the UCS values allowed characterizing the analyzed mixture as lean concrete. Based on the laboratory results, mechanistic-empirical design of asphalt pavements using CTCS base course and sub-base layers was conducted. The study highlights the significant influence of choosing between these two structures for asphalt pavement design. Proper selection of the structure is crucial to consider the specific characteristics of the structure under analysis as well as to meet safety and performance requirements. It was observed that the base course layers converged to a single degradation mechanism, which is the effective fatigue life of the cemented layer, with very close values for the critical N. Meanwhile, for sub-base layers, data analysis also converged to the same degradation mechanism, but with the fatigue life of the asphalt concrete layer. However, despite this unified behavior, a disparity in critical N values was observed for the sub-base layer, showing a coefficient of variation of 73% among the analyzed structures. In summary, the study emphasizes the need for comprehensive analysis when selecting the type of structure for asphalt pavement design, considering not only the properties of the materials but also the expected behavior of the structure as a whole.

Keywords: cement-treated crushed stone, mechanical behavior, flexural tensile strength, mechanistic-empirical design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas granulométricas de BGTC, conforme especificações técnicas	18
Figura 2 - Equipamentos utilizados na moldagem dos CPs: (a) compactador vibratório, (b) molde prismático e (c) molde cilíndrico	23
Figura 3 - Ensaio de resistência à compressão simples: antes (a) e depois (b) da ruptura	24
Figura 4 - Ensaio de resistência à tração na flexão: antes (a) e depois (b) da ruptura	25
Figura 5 - Resultados de resistência à compressão simples	30
Figura 6 - Resultados de resistência à tração na flexão.....	31
Figura 7 - Curvas de tensão de tração normalizadas por deformação	32
Figura 8 - Curvas de tensão por deformação.....	33
Figura 9 - Resultados das análises das estruturas com camada de base em BGTC, considerando seu $N_{crítico}$	36
Figura 10 - Resultados das análises das estruturas com camada de sub-base em BGTC, considerando seu $N_{crítico}$	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de ensaios mecânicos obtidos por outros pesquisadores	20
Tabela 2 - Caracterização física do cimento utilizado na pesquisa	22
Tabela 3 - Estruturas analisadas utilizando BGTC na camada de base (a) e sub-base (b)	29
Tabela 4 - Classificação dos materiais cimentados de acordo com a RCS	30
Tabela 5 - Deformação na ruptura, de acordo com o teor de cimento	32
Tabela 6 - Parâmetros das camadas estudadas	34
Tabela 7 - Valores de N para cada mecanismo de ruptura das camadas de base em BGTC	35
Tabela 8 - Valores de N para cada mecanismo de ruptura das camadas de sub-base em BGTC	36
Tabela 9 - Resultados de Ncrítico para as estruturas com camada de base em BGTC	38
Tabela 10 - Resultados de Ncrítico para as estruturas com camada de sub-base em BGTC	38

LISTA DE SIGLAS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Official*

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEMC: Análise Elástica de Múltiplas Camadas

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

BGTC: Brita Graduada Tratada com Cimento

CTCS: *Cement -Treated Crushed Stone*

DER-PR: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná

DER-SP: Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

LPAV: Laboratório de Pavimentação – UFRGS

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – UFRGS

LVDT: *Linear Variable Differencial Transducer*

MEF: Módulo de Elasticidade na Flexão

MRD: Módulo de Resiliência por Compressão Diametral

MRT: Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial

RCD: Resistência à Tração por Compressão Diametral

RCS: Resistência à Compressão Simples

RTF: Resistência à Tração na Flexão

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho_{\text{máx}}$: Massa Específica Aparente Seca

$\omega_{\text{ót}}$: Umidade Ótima

δ : Deslocamento em 95% da Carga de Ruptura

σ_j : Tensão de Tração Normalizada

ε_j : Deformação Correspondente

σ_1 : Tensões Principal Maior atuando na metade da camada granular

σ_3 : Tensões Principal Menor atuando na metade da camada granular

C: Coesão

Φ : Ângulo de atrito

K: Constante relacionada à umidade

σ_v : Tensão vertical de compressão no topo da camada cimentada

ε : Deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada cimentada

ε_b : Deformação na ruptura

ε_v : Deformação vertical de compressão no topo da camada do subleito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	BASES GRANULARES TRATADAS COM CIMENTO	17
2.2	GRANULOMETRIA DAS MISTURAS DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO	17
2.3	PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO	18
2.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS RELEVANTES.....	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1	MATERIAIS	21
3.1.1	<i>AGREGADOS</i>	21
3.1.2	<i>CIMENTO PORTLAND</i>	21
3.1.3	<i>MISTURA DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)</i> 22	
3.2	MÉTODOS.....	22
3.2.1	<i>ENSAIOS LABORATORIAIS</i>	22
3.2.2	<i>DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO COM CAMADAS DE BGTC</i>	26
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
4.1	ENSAIOS LABORATORIAIS.....	30
4.1.1	<i>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)</i>	30
4.1.2	<i>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (RTF)</i>	31
4.2	<i>DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO COM CAMADAS DE BGTC</i>	34
4.2.1	<i>ESTRUTURAS COM CAMADA DE BASE UTILIZANDO BGTC</i>	35
4.2.2	<i>ESTRUTURAS COM CAMADA DE SUB-BASE UTILIZANDO BGTC</i>	36
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES ACERCA DO DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO COM CAMADAS DE BGTC.....	37
5	CONCLUSÕES	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
	ANEXO A.....	42

1 INTRODUÇÃO

Cerca de 60% do transporte de carga no Brasil ocorre através das vias rodoviárias, sistema este composto por mais de 2,6 milhões de caminhões, de acordo com Soliani (2022). Por conta disso, tal modal deve garantir condições ideais de tráfego eficiente e seguro, resultando em uma redução no tempo de transporte. Para assegurar que as rodovias possam suportar as exigências provenientes do transporte de cargas e proporcionar o desempenho necessário, é imprescindível realizar um adequado controle dos materiais e dimensionamento do pavimento.

Os pavimentos podem ser categorizados em três tipos, sendo eles flexíveis, rígidos e semirrígidos. Segundo Silva et al. (2021), no contexto brasileiro, a predominância recai sobre os pavimentos flexíveis, que compõem a maior parte da malha rodoviária. Estes pavimentos são construídos com múltiplas camadas com diferentes funções, visando atender aos requisitos específicos do projeto. Para conferir uma maior resistência, como alternativa viável, surge a opção de substituir as camadas granulares de base e/ou sub-base por materiais cimentados, tornando, assim, o pavimento do tipo semirrígido.

Os pavimentos semirrígidos possuem uma deformabilidade intermediária, combinando os pontos positivos entre os pavimentos rígidos e flexíveis (Sunil et al., 2021). Existem duas aplicações para o pavimento semirrígido, sendo elas a direta, na qual o revestimento asfáltico é aplicado sobre uma camada de base cimentada, e a indireta, ou invertida, que ocorre quando o revestimento asfáltico é aplicado sobre uma camada de base granular e sub-base cimentada, assim evitando a reflexão de trincas.

Dentre os possíveis materiais cimentados existentes, destaca-se a brita graduada tratada com cimento (BGTC), que é composta por três elementos: brita graduada simples, com adição de cimento Portland e água. Segundo Andrade et al. (2015), a água na mistura da BGTC facilita a compactação e hidratação do cimento na fração granular fina, formando uma pasta que se conecta pontualmente aos agregados graúdos, ao contrário do concreto Portland, onde os agregados são totalmente envolvidos pela pasta. Esta mistura é comumente utilizada em camadas de base e sub-base de pavimentos, permitindo que a estrutura consiga resistir a níveis superiores de tensão à tração e de compressão (Balbo, 2007). Isto faz com que a BGTC seja bastante utilizada, principalmente, em pavimentos de vias de alto volume de tráfego (Bernucci et al, 2022).

Ademais, o dimensionamento mecanístico-empírico surge como uma abordagem que combina princípios mecânicos sólidos com dados empíricos reais, visando projetar pavimentos mais eficientes e duráveis. Essa abordagem permite considerar a interação complexa entre os materiais do pavimento, as cargas aplicadas e as condições ambientais, levando a um projeto mais realista e ajustado à realidade das estradas.

O presente estudo tem como objetivo compreender o impacto gerado pela inclusão de camadas de BGTC no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos. Para tal, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e de resistência à tração na flexão (RTF) em amostras de BGTC com dois teores distintos de cimento, de modo a obter parâmetros utilizados no dimensionamento, como módulo de elasticidade na flexão (MEF) e deformação na ruptura. Também foram utilizados dados prévios de módulo de resiliência por compressão triaxial (MRT) para realizar o dimensionamento dessas estruturas, possibilitando a comparação entre a forma de consideração do material (tração linear e compressão não-linear).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor compreensão dos parâmetros da BGTC, bem como de sua aplicação em um pavimento rodoviário, este tópico expõe referências e estudos previamente conduzidos. São explorados aspectos conceituais e de dosagem, além de serem analisados os efeitos dos diversos componentes da mistura no comportamento mecânico do material em questão.

2.1 BASES GRANULARES TRATADAS COM CIMENTO

A crescente utilização da BGTC no Brasil remonta ao final da década de 1970, quando a demanda por soluções robustas para pavimentação rodoviária começou a ascender significativamente. A estabilização de materiais granulares com cimento começou a partir de obras no Estado de São Paulo, como: Rodovia dos Imigrantes (1974), Rodovia dos Bandeirantes (1978) e Rodovia dos Trabalhadores (1982). Desde então, tem sido amplamente utilizada, especialmente em pavimentos de vias com alto volume de tráfego (Bernucci et al., 2022).

Entretanto, segundo Paixão et al. (2017), seu alto custo de implantação, comparada a técnicas semelhantes, aliada à pouca informação, e a erros de execução, acarreta a exclusão desta técnica nos projetos rodoviários. Por se tratar de uma solução que utiliza cimento em sua composição, necessita de um elevado controle tecnológico, que envolve a monitorização rigorosa da dosagem do cimento, o teor de umidade, a granulometria dos agregados, a uniformidade da mistura e a compactação adequada. Consoante a isso, Chakrabarti e Kodikara (2003) comentam que o aumento no teor de cimento provoca maior retração da camada durante a hidratação, o que leva ao aparecimento de microfissuras e trincas.

Balbo (2006) alega que, mecanicamente, após a fissuração, a base atua como um conjunto de blocos, criando entalhes que favorecem a abertura e a propagação ascendente de fissuras no revestimento asfáltico. Essas fissuras, resultantes do contato, geram descontinuidades na distribuição de tensões na interface, concentrando-se na face inferior do revestimento. Esse fenômeno muitas vezes induz à fissura prematura na camada superior, que, ao responder em flexão e permanecer aderida à base fissurada, atua como um entalhe de abertura progressiva.

Um exemplo prático é que, em São Paulo, após aproximadamente 40 anos de construção, milhares de quilômetros de rodovias com bases cimentadas já se encontravam deterioradas. Segundo Balbo (2006), seria inconcebível empregar a BGTC em camadas de base para rodovias de tráfego pesado, dadas suas insanáveis limitações.

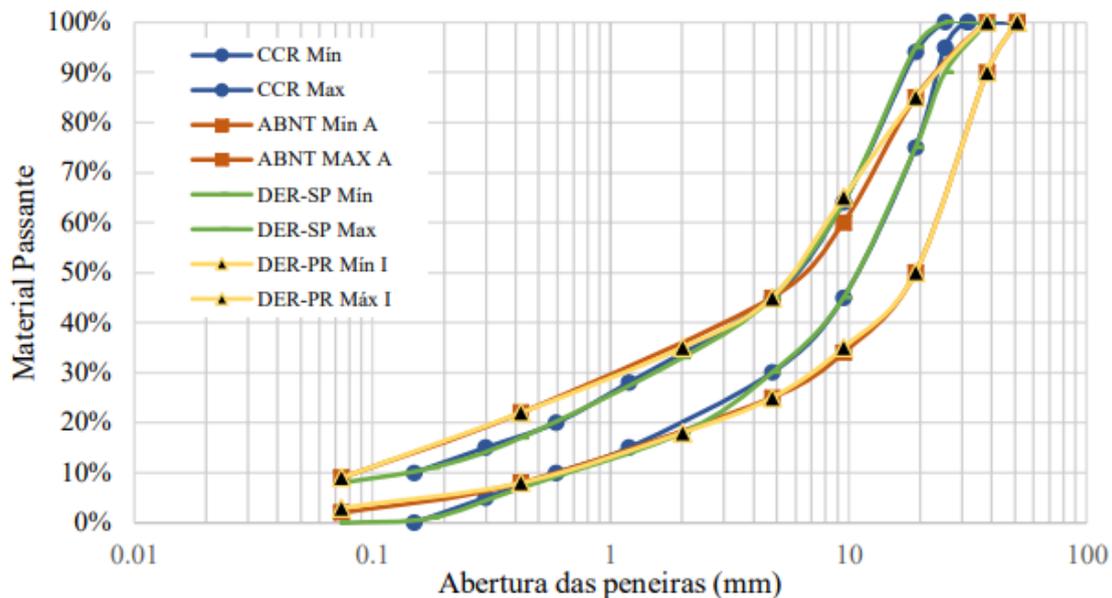
Uma alternativa viável para sanar a reflexão de trincas para o revestimento de concreto asfáltico, segundo Suzuki (1992), é empregar a BGTC em pavimentos do tipo invertido, que consiste em uma base granular e sub-base cimentada. Esta solução permite que a camada de base absorva as reflexões de trincamento causadas pela camada de sub-base. Porém, segundo Rodrigues (2020), conforme a passagem do tempo, surgirá um aumento das deformações de tração sob o revestimento asfáltico, à medida que as condições de suporte fornecidas pela sub-base forem sendo degradadas por conta do tráfego intenso.

2.2 GRANULOMETRIA DAS MISTURAS DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

A correta distribuição granulométrica dos agregados em uma camada de base ou sub-base de um pavimento desempenha um papel fundamental na eficiência e na durabilidade da

infraestrutura rodoviária. Segundo Lima e Motta (2015), o desempenho do pavimento está relacionado não só com a qualidade dos agregados, como também com sua distribuição granulométrica, podendo esta última influenciar propriedades importantes da estrutura como a deformação permanente. Além disso, Carvalho et al. (2014) comentam que a uniformidade na distribuição granulométrica promove uma compactação mais eficaz durante a construção, o que resulta em uma superfície mais estável e resistente ao desgaste. A correta seleção e disposição dos agregados são, portanto, cruciais para otimizar o desempenho estrutural do pavimento e garantir sua capacidade de suportar as cargas do tráfego ao longo do tempo. A Figura 1 apresenta comparativamente as faixas granulométricas de especificações utilizadas nacionalmente, sendo essas: ABNT NBR 11803 (2013b), DER-SP (2005), DER-PR (2018) e CCR (2002).

Figura 1 - Curvas granulométricas de BGTC, conforme especificações técnicas



Fonte: Silveira (2023)

2.3 PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO

A relação entre a massa específica aparente seca máxima da mistura ($\rho_{m\acute{a}x}$) e a umidade ótica ($\omega_{ót}$) está ligada à compacidade e à densidade de uma mistura de agregados e ligantes. Para determinar esses dois parâmetros, utiliza-se o ensaio de compactação conforme descrito no método de ensaio 162 (DNER, 1994).

A compactação pode ser realizada com energia normal, intermediária ou modificada. Embora as normas e especificações brasileiras para materiais cimentados recomendem a compactação com energia intermediária, uma observação comum ao revisar as fontes bibliográficas é que a energia modificada é a mais utilizada na prática. Isso se deve ao fato de que, ao compactar com energia intermediária, há uma redução no desempenho mecânico da BGTC em comparação com as amostras compactadas com energia modificada.

A seguir, é fornecida uma breve relação entre os dois parâmetros abordados neste tópico, com o objetivo de identificar o impacto do teor de cimento nesses aspectos:

- Klinsky e Faria (2015) realizaram investigações envolvendo misturas de BGTC utilizando teores de cimento de 2%, 3% e 4%, submetendo-as aos ensaios de compactação nas energias intermediária e modificada. Sob as condições de energia intermediária, observaram uma variação máxima de 0,04 g/cm³ na massa específica seca máxima e 0,5% na umidade ótima. Por outro lado, na energia modificada, essas variações foram reduzidas para 0,03 g/cm³ e 0,1%, respectivamente, para as mesmas propriedades.
- Prado (2018) estudou misturas de BGTC com teores de cimento de 3%, 4% e 5%. Estas misturas foram compactadas na energia modificada, resultando em uma variação máxima de 0,04 g/cm³ na massa específica seca máxima e 1,6% na umidade ótima.
- Através do ensaio de compactação utilizando a energia modificada, Nunes e Albuquerque (2021) verificaram que as combinações de BGTC contendo teores de cimento de 3% e 5% exibiram uma variação de 0,1 g/cm³ na massa específica seca máxima e 0,6% no teor de umidade ótima.

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS RELEVANTES

Quando sujeitas ao tráfego, as camadas de pavimento constituídas por materiais cimentados, como a BGTC, geram tração por flexão na fibra inferior da camada. Essa tração é contrabalançada e resistida através de sua cimentação ou coesão. Por conta disso, é imprescindível medir a resistência à tração na flexão, pois este parâmetro tem uma grande influência no controle precoce da retração e na vida útil do pavimento (Cervo et al., 2010).

Paul e Gnanendran (2012) analisaram propriedades mecânicas à flexão e o efeito da taxa de carregamento/deslocamento em materiais granulares estabilizados com cimento. Observou-se um aumento significativo (aproximadamente 42%) na resistência à flexão com o aumento da taxa de deslocamento (r) de 0,01 mm/min para 1,2 mm/min. No entanto, essa relação mostrou-se altamente não linear. Notavelmente, os valores de resistência foram mais sensíveis a taxas de deslocamento mais lentas, inferiores a 0,1 mm/min. À medida que a taxa de deslocamento ultrapassava 0,1 mm/min, o aumento na resistência à flexão tornava-se relativamente suave.

Estudos experimentais variando o teor de cimento em misturas de BGTC foram conduzidos por Yeo (2011), considerando características mecânicas do material cimentado. Nascimento e Albuquerque (2018) apresentaram resultados para vigotas com 3% de cimento, incluindo resistência à tração na flexão e compressão simples. Prado (2018) alcançou RTF média de 1,19 MPa aos 28 dias com agregados graníticos e 5% de cimento.

O Relatório Técnico da *Austroads* (2008) fornece resultados de resistência, aos 28 dias, para materiais cimentados com origens de rocha corneana e siltitos, incluindo resistência à compressão simples e tração na flexão. Na Tabela 1 é possível observar os resultados obtidos em todos os estudos citados acima.

Tabela 1 - Resultados de ensaios mecânicos obtidos por outros pesquisadores

Autor	Material	Teor de Cimento	Tempo de Cura (dias)	RCS (MPa)	RTF (MPa)	MEF (MPa)	εruptura (μstrain)
Yeo (2011)	BGTC	1,0%	28	-	0,50	439	2346
		2,0%		5,30	0,81	931	1493
		3,0%		5,91	1,38	2190	1263
		4,0%		6,74	2,05	3511	1481
		5,0%		7,20	2,20	3949	1099
Paul e Gnanendran (2012)	Mistura estabilizada com cinza volante Agregado local de Canberra	1,0%	7	-	0,10	203	1020
		1,5%		-	0,25	1620	270
		2,0%		-	0,33	2040	216
	3,0%	-		0,50	2507	214	
	Mistura estabilizada com cinza volante Agregado local de Queensland	1,0%		-	0,10	159	1720
		1,5%		-	0,63	2642	322
		2,0%		-	0,85	4408	235
3,0%		-	1,17	5466	237		
Nascimento e Albuquerque (2018)	BGTC	3,0%	7	3,54	-	-	-
			14	3,63	-	-	-
			28	4,15	0,34	-	-
Prado (2018)	BGTC	5,0%	28	-	1,19	-	-
Austroads (2008)	Mistura Cimentada agregado <i>hornfel</i>	3,0%	28	7,10	1,01	16560	95
	Mistura Cimentada agregado <i>siltstone</i>	4,0%	28	6,50	1,13	11030	-

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo dá continuidade ao trabalho desenvolvido por Silveira (2023), também desenvolvido no Laboratório de Pavimentação da UFRGS, que realizou ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral (MRD), de resistência à tração por compressão diametral (RCD) e do módulo de resiliência por compressão triaxial (MRT), variando o teor de cimento entre 1 e 6%. Destaca-se que os materiais utilizados na presente pesquisa são os mesmos estudados por Silveira (2023).

Posto isto, este trabalho teve como objetivo estudar as propriedades mecânicas da BGTC e fazer uma análise destes parâmetros, a fim de realizar o dimensionamento mecânico-empírico de um pavimento asfáltico utilizando camadas de BGTC.

Analisando os resultados obtidos por Silveira (2023), os ensaios de MRT foram realizados somente com o teor de 3% de cimento. Em relação aos resultados de MRD, é importante ressaltar que apenas foi viável realizar o ensaio para o teor de cimento de 6%. Isso se deve ao fato de que amostras com teores de cimento menores apresentaram resistências que não eram compatíveis com o procedimento do ensaio. Portanto, para este trabalho, foram analisados dois teores de cimento, sendo eles 3% e 6%, que foram escolhidos a fim de se comparar resultados com os já obtidos a partir de outros ensaios para o mesmo material.

Para isso, inicialmente, foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão (RTF). Além da resistência, estes ensaios permitiram extrair dados como o Módulo de Elasticidade na Flexão (MEF) e a deformação na ruptura. Também foram realizados ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS). Os detalhes sobre os materiais empregados e os métodos utilizados são descritos a seguir.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 AGREGADOS

O material agregado foi obtido diretamente na usina de solos localizada na cidade de Marques de Souza, no estado do Rio Grande do Sul, próxima à rodovia BR-386. Com o intuito de aprimorar o processo e obter uma compreensão mais precisa do comportamento do material em seu estado pronto para utilização, a coleta da amostra incluiu as frações específicas de cada agregado que compõem a curva granulométrica, estando dentro dos limites estabelecidos no item 2.2. É relevante destacar que a amostra foi adquirida sem a incorporação de água e cimento, uma vez que esses componentes foram adicionados em laboratório no momento da mistura, antecedendo a fase de moldagem.

Os agregados utilizados possuem índice de forma igual a 2,72, perda por abrasão Los Angeles de 20,13%, e Equivalente de Areia de 58,42% (Silveira, 2023). Estes valores atendem às normas regulamentadoras e especificações técnicas que estabelecem os critérios de aceitação para materiais utilizados nas camadas de sub-bases e bases de BGTC em obras rodoviárias no Brasil (DER/SP, 2005; DER/PR, 2005).

3.1.2 CIMENTO PORTLAND

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP II-Z 40, conforme definido pela NBR 16697 (ABNT, 2018b), classificado como Cimento Portland Composto (CP II) com adição de pozolana (Z), e deve demonstrar valores mínimos de resistência à compressão de 40 MPa aos 28 dias de cura.

O conhecimento das características físicas do cimento é essencial na dosagem da BGTC. A caracterização física do cimento seguiu as normas estabelecidas pela ABNT e consistiu principalmente nos ensaios listados a seguir:

- Determinação da finura do cimento - conforme a NBR 11579 (ABNT, 2013a);
- Determinação da massa específica do cimento Portland - conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017);
- Determinação do início e fim de pega – conforme a NBR 16607 (ABNT, 2018a).

Os resultados provenientes dos ensaios (conforme apresentado na Tabela 2) foram considerados apropriados para o tipo de cimento empregado, em conformidade com as especificações do material estipuladas no documento (DNER, 1995).

Tabela 2 - Caracterização física do cimento utilizado na pesquisa

Ensaio	Resultado	Referência Normativa
Finura (%)	0,99	$\leq 10\%$
Tempo Início de Pega (h)	02:38	≥ 1
Tempo Fim de Pega (h)	03:18	≤ 10
Massa Específica (g/cm ³)	3,03	-

Fonte: Silveira (2023)

3.1.3 MISTURA DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)

De acordo com Silveira (2023), a determinação do teor de umidade empregado nas misturas, destinado à moldagem dos corpos de prova para os ensaios mecânicos da BGTC, foi conduzida por meio do ensaio de compactação, realizados de acordo o método de ensaio 162 (DNER, 1994), utilizando a energia modificada. Sua realização permitiu estabelecer a quantidade de água necessária, conhecida como umidade ótima ($\omega_{ót}$), para atingir a massa específica aparente seca máxima da mistura ($\rho_{máx}$), considerando um teor de cimento de 2,7%, valor aplicado na obra em questão. Os resultados obtidos indicaram uma umidade ótima de 6,25% e uma massa específica aparente seca máxima da mistura de 2,326 g/cm³ (Silveira, 2023).

Conforme ressaltado na revisão bibliográfica, percebe-se uma variação mínima dos parâmetros de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima da mistura à medida que se varia o teor de cimento. Portanto, a decisão foi manter constantes esses dois valores para as duas misturas estudadas (3 e 6%).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 ENSAIOS LABORATORIAIS

Como metodologia de pesquisa, definiu-se que seriam ensaiados apenas dois teores de cimento, sendo as amostras curadas por 28 dias. Silveira (2023) ressaltou que o ensaio de MRD foi realizado apenas para o teor de cimento de 6%, pois amostras com proporções menores de cimento demonstraram resistências incompatíveis com o teste.

Os teores de cimento de uma BGTC costumam variar entre 3% e 5% (Oklahoma DOT, 2013; Nevada DOT, 2014; LCPC, 1994). Teores de cimento acima destas porcentagens não costumam ser utilizados em camadas de BGTC, por apresentarem um elevado módulo de elasticidade, resultando na fissuração das camadas superiores, porém, neste estudo foi empregado visando a compreensão do comportamento das misturas contendo alto teor de cimento.

Para os ensaios de resistência à tração na flexão, foram utilizados corpos de prova prismáticos, com dimensões de 10 cm de largura, 10 cm de altura e 40 cm de comprimento. Para estas amostras, a moldagem foi realizada empregando o método de compactação vibratória, em três camadas, conforme as Figuras 2(a) e (b). Os corpos de prova moldados para os ensaios de RCS foram moldados também pelo método de compactação vibratória, porém em formato cilíndrico, conforme a Figura 2(c). Para as amostras cilíndricas, a moldagem é realizada em 10 camadas,

obtendo CPs com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Todas as etapas de moldagem foram realizadas conforme o método de ensaio 181 (DNIT, 2018).

Os corpos de prova cilíndricos foram desmoldados imediatamente após o término da compactação, enquanto os corpos de prova prismáticos aguardaram um dia dentro dos moldes para então serem desmoldados. Todos os corpos de prova foram armazenados em sacos plásticos logo após a moldagem, e mantidos em câmara úmida com temperatura ambiente e umidade relativa do ar controlada em 89%, sem imersão de água, durante 28 dias.

Figura 2 - Equipamentos utilizados na moldagem dos CPs: (a) compactador vibratório, (b) molde prismático e (c) molde cilíndrico



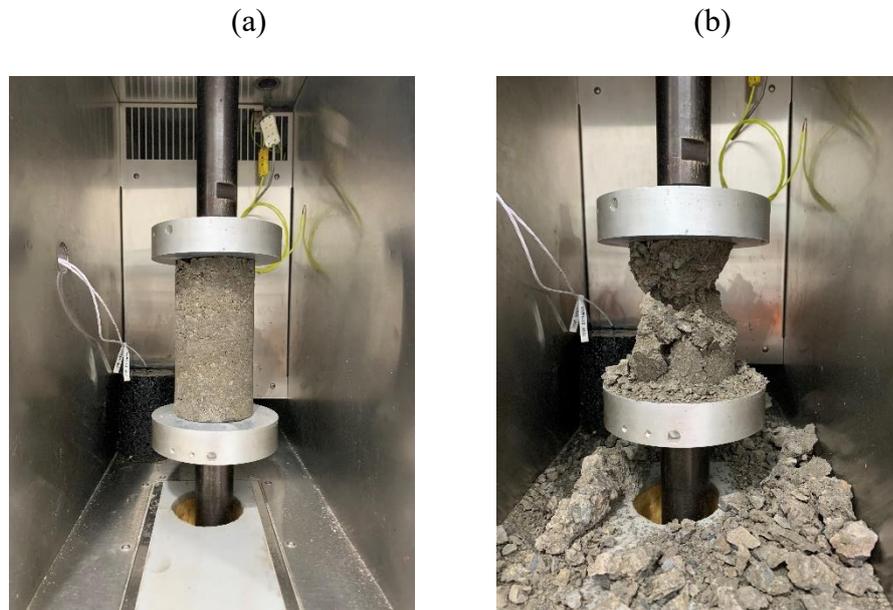
Fonte: Autora

3.2.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos pelo método de ensaio 91 (DNER, 1998), recomendada para concreto, por conta da não existência de normas adequadas para materiais estabilizados com cimento. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LAPAV), utilizando uma prensa hidráulica da MTS, modelo 810 *UTM Test System*, com capacidade de carga de 250 kN.

Antes de iniciar o ensaio, é necessário limpar e secar as superfícies dos pratos, bem como as do corpo de prova, pois qualquer sujeira, poeira ou resíduos nas superfícies de contato pode interferir na aplicação uniforme da carga durante o ensaio. Isso pode levar a resultados imprecisos ou inconsistentes. Após essa preparação, posiciona-se cuidadosamente o corpo de prova no prato inferior, utilizando os círculos concêntricos de referência para assegurar a centralização, enquanto se observa a orientação resultante do processo de moldagem. A disposição do ensaio de RCS é ilustrada na figura 3(a). A carga foi aplicada a uma taxa de 2,356 kN/s, conforme sugerido por norma.

Figura 3 - Ensaio de resistência à compressão simples: antes (a) e depois (b) da ruptura



Fonte: Autora

A RCS do corpo-de-prova foi calculada pela da Equação (1), conforme exposto no método de ensaio 91 (DNER, 1998):

$$RCS = \frac{4 \times Q}{\pi \times d^2} \quad (1)$$

Onde:

RCS – Resistência à compressão simples (MPa);

Q – Carga máxima alcançada (N);

d – Diâmetro do corpo-de-prova (mm).

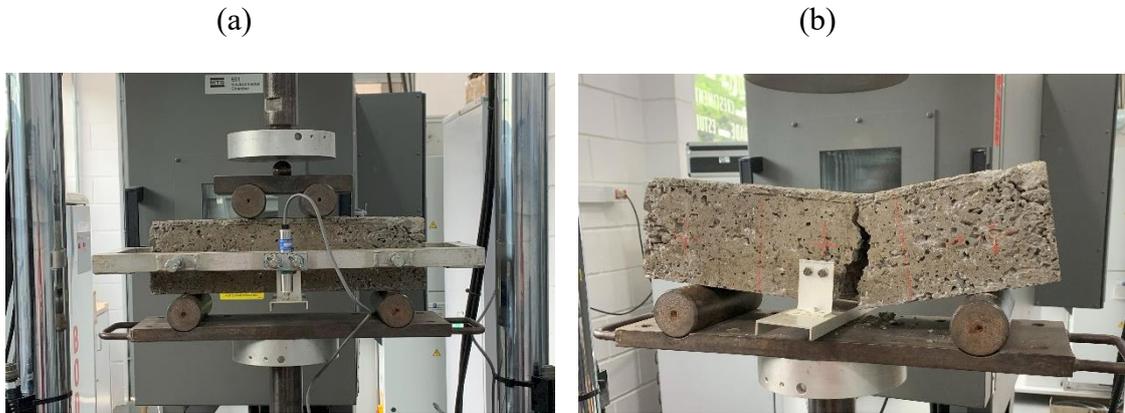
3.2.1.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (RTF)

Os ensaios resistência à tração na flexão foram conduzidos conforme os procedimentos estabelecidos pela norma americana D1635-M (ASTM, 2012), recomendada para solo-cimento. As análises foram realizadas no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LAPAV), utilizando uma prensa hidráulica da MTS, modelo 810 *UTM Test System*, com capacidade de carga de 250 kN.

As vigotas testadas neste estudo possuíam dimensões diferentes (10 x 10 x 40 cm) em comparação com as especificadas nos procedimentos de referência (7,6 x 7,6 x 29 cm). Essa modificação resultou da adaptação dos equipamentos do LAPAV para ensaios envolvendo misturas de material fresado, brita graduada simples e cimento Portland (López, 2016). Portanto, os procedimentos adotados neste ensaio assemelham-se aos desenvolvidos pelo autor. A disposição do ensaio de tração na flexão é ilustrada na Figura 4(a). Antes da realização do ensaio, fixava-se à vigota, em sua altura média, um suporte do tipo "yoke", concebido por López (2016) com base no protocolo SF4 (JSCE, 1984). Nele, um LVDT era posicionado para registrar os deslocamentos. Após, apoiava-se a vigota em um sistema de tração em quatro

pontos. A carga era aplicada a uma taxa constante de 2,3 kN/min, ajustada de acordo com as dimensões da vigota.

Figura 4 - Ensaios de resistência à tração na flexão: antes (a) e depois (b) da ruptura



Fonte: Autora

O cálculo para a RTF se deu através da equação (2), que considera o máximo valor de tração na flexão, assim como as dimensões da vigota.

$$RTF = \frac{P \times L}{W \times H^2} \quad (2)$$

Onde:

RTF – Resistência à tração na flexão (MPa);

P – Força máxima aplicada (N);

L – Comprimento entre os eixos dos cilindros de apoio (mm);

W – Largura da vigota (mm);

H – Altura da vigota (mm).

Após a ocorrência da ruptura, mediu-se a distância entre o ponto de formação da trinca e a extremidade mais próxima da vigota (L_t), com uma precisão de 1 mm. Se L_t fosse inferior a 135 mm, os resultados do ensaio eram descartados, tornando a Equação (2) válida somente quando a ruptura se dava no terço médio da vigota. As marcações que delimitam o terço médio são visíveis na Figura 5(b).

3.2.1.2.1 DEFORMAÇÃO NA RUPTURA

A deformação na ruptura foi calculada utilizando a Equação (3) conforme especificada pela *Austroads* (2012). Em conformidade com as diretrizes da *Austroads* (2008), é aconselhável levar em consideração a deformação correspondente a 95% da carga de ruptura, devido à menor variabilidade dos valores de deformação nesse estágio do ensaio.

$$\varepsilon_{ruptura} = \frac{108 \times \delta \times H \times 1000}{23 \times L^2} \quad (3)$$

Onde:

- $\varepsilon_{ruptura}$ – Deformação na ruptura (μ strain);
- δ – Deslocamento em 95% da carga de ruptura (mm);
- L – Comprimento entre os eixos dos cilindros de apoio (mm);
- H – Altura da vigota (mm).

3.2.1.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO (MEF)

Com base no gráfico tensão-deformação e utilizando a Equação (4), o módulo de elasticidade na flexão (MEF) foi estimado para cada teor de cimento estudado. Para realizar essa estimativa, empregou-se a tensão de tração normalizada, definida como a relação entre as tensões de tração aplicadas durante o ensaio e a resistência à tração na flexão, no intervalo de 20 a 100% da RTF (López, 2016). É relevante observar que o MEF considerado nas análises mecanísticas corresponde ao módulo secante quando a carga aplicada atinge entre 30% e 60% da resistência da mistura, conforme recomendado pelas diretrizes da *Austroroads* (2008).

$$MEF = \frac{\sigma_j}{\varepsilon_j} \times 10^6 \quad (4)$$

Onde:

- MEF – Módulo estático flexural (MPa);
- σ_j – Tensão de tração normalizada (MPa);
- ε_j – Deformação correspondente (μ strain).

3.2.2 DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO COM CAMADAS DE BGTC

O método de dimensionamento mecanístico da República da África do Sul é amplamente reconhecido internacionalmente, e uma de suas características notáveis é a obtenção das funções de transferência por meio de experimentos de campo, diferentemente dos dados deste estudo, que são provenientes de ensaios de laboratório. Este método já possui modelos gerados e calibrados com dados de campo, o que permite a utilização de parâmetros facilmente obtidos em laboratório, como RTF, RCS, MRT, entre outros. Ademais, o método permite a avaliação de materiais cimentados, o que também influenciou na escolha.

Conseqüentemente, a metodologia adotada para o dimensionamento das estruturas de pavimentos asfálticos neste trabalho envolveu a análise dos dados obtidos por meio do AEMC, com o objetivo de estimar o número máximo de solicitações de eixos padrão que as estruturas podem suportar antes de falhar, além de compreender os mecanismos de falha envolvidos. Para isso, foram utilizados os modelos de previsão propostos pelo SAPEM (2014), os quais estão apresentados a seguir, categorizados de acordo com o tipo de camada.

É relevante ressaltar que o SAPEM ajusta os índices conforme a categoria da rodovia, considerando diferentes níveis de confiabilidade. Assim, todas as análises foram conduzidas para um nível de confiabilidade de 90%. Com base nos resultados obtidos para os diversos mecanismos de ruptura, determinou-se o $N_{crítico}$, representando o menor deles. Esse valor foi considerado como o número máximo permitido de solicitações de eixos padrão, sendo importante destacar que corresponde ao padrão N_{AASHTO} .

3.2.2.1 CAMADAS ASFÁLTICAS

A vida de fadiga das camadas asfálticas foi determinada através das equações (5) e (6):

$$N_f = FE \times 10^{\alpha \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{\beta}\right)} \quad (5)$$

$$FE = 0,0489 \times t - 0,2225 \quad (6)$$

Onde:

N_f – Vida de fadiga;

α e β – Constantes, de acordo com a espessura, as características (granulometria ou MR) e nível de confiabilidade;

ε_t – Deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada asfáltica (μ strain);

FE – Fator de espessura relacionado à propagação das trincas;

t – Espessura da camada asfáltica (mm).

3.2.2.2 CAMADAS GRANULARES

A resistência ao cisalhamento foi determinada através das equações (7) e (8). Cabe informar que a condição de umidade foi considerada como moderada.

$$N = 10^{(\alpha F + \beta)} \quad (7)$$

$$F = \frac{\sigma_3 \left\{ K \left[\tan^2 \left(45 + \frac{\Phi}{2} \right) - 1 \right] \right\} + 2KC \tan \left(45 + \frac{\Phi}{2} \right)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (8)$$

Onde:

N – Número equivalente de eixo padrão para proteção contra resistência ao cisalhamento;

α e β – Constantes relacionadas ao nível de confiabilidade;

F – Relação de tensões;

σ_1 e σ_3 – Tensões principais, maior e menor, atuando na metade da camada granular;

C – Coesão;

Φ – Ângulo de atrito;

K – Constante relacionada à umidade.

3.2.2.3 CAMADAS CIMENTADAS

Os mecanismos de ruptura por esmagamento avançado e vida de fadiga efetiva foram calculados pelas equações (9), (10) e (11), respectivamente.

$$N_{ea} = 10^{a \left(1 - \frac{\sigma_v}{b \times RCS}\right)} \quad (9)$$

$$N_{fe} = FE \times 10^{c \left(1 - \frac{\varepsilon}{d \times \varepsilon_b}\right)} \quad (10)$$

$$FE = 10^{(0,00285 \times t - 0,293)} \quad (11)$$

Onde:

N_{ea} – Número equivalente de eixos padrão para esmagamento avançado;

σ_v – Tensão vertical de compressão no topo da camada cimentada;

RCS – Resistência à compressão simples (kPa);

a e b – Constantes relacionadas ao nível de confiabilidade;

N_{fe} – Vida de fadiga efetiva;

ε – Deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada cimentada (μ strain);

ε_b – Deformação na ruptura (μ strain);

c e d – Constantes relacionadas ao nível de confiabilidade;

FE – Fator de espessura relacionado à propagação das trincas;

t – Espessura da camada cimentada (mm).

É importante notar que quando a camada cimentada atinge o número de solicitações correspondente à vida efetiva de fadiga, ela assume um comportamento granular. Isso implica que, além desse N, é necessário adicionar o número de solicitações que o pavimento passa a suportar a partir desse ponto. No entanto, devido à falta de informações sobre o comportamento granular da BGTC estudada nesta pesquisa, a decisão foi considerar o N_{fe} como o término da vida útil do pavimento, especificamente nos casos em que a fadiga da camada cimentada é o mecanismo que leva à ruptura do pavimento.

3.2.2.4 SUBLEITO

A deformação permanente foi calculada através da equação (12):

$$N_{dp} = 10^{(a-10 \log \varepsilon_v)} \quad (12)$$

Onde:

N_{dp} – Número equivalente de eixos padrão para definir o nível de deformação permanente;

ε_v – Deformação vertical de compressão no topo da camada do subleito;

a – Constante relacionada ao nível de confiabilidade e à profundidade do sulco gerado pela deformação permanente.

3.2.2.5 ESTRUTURAS DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO COM CAMADAS DE BGTC

Neste estudo, são analisados pavimentos semirrígidos que empregam camadas de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). No contexto desses pavimentos, existem duas configurações principais: a aplicação direta, onde o revestimento asfáltico é sobreposto a uma base cimentada, e a aplicação invertida, onde o revestimento asfáltico é sobreposto a uma base granular e sub-base cimentada. Assim, para as análises realizadas, diferentes estruturas foram consideradas para um pavimento hipotético utilizando camadas de BGTC, contemplando a utilização do material cimentado tanto nas camadas de base quanto nas camadas de sub-base, conforme a Tabela 3. Para visualização dos diagramas de cada estrutura, vide Anexo A.

Tabela 3 - Estruturas analisadas utilizando BGTC na camada de base (a) e sub-base (b)

(a)				(b)			
Estrutura	Camada	Material	Espessura (cm)	Estrutura	Camada	Material	Espessura (cm)
B20_CA10	Revestimento	Concreto Asfáltico	10	SB20_CA10	Revestimento	Concreto Asfáltico	10
	Base	BGTC	20		Base	BGTC	20
	Sub-Base	BGS	20		Sub-Base	BGS	20
	Subleito	Solo	-		Subleito	Solo	-
B25_CA10	Revestimento	Concreto Asfáltico	10	SB25_CA10	Revestimento	Concreto Asfáltico	10
	Base	BGTC	25		Base	BGTC	25
	Sub-Base	BGS	25		Sub-Base	BGS	25
	Subleito	Solo	-		Subleito	Solo	-
B20_CA15	Revestimento	Concreto Asfáltico	15	SB20_CA15	Revestimento	Concreto Asfáltico	15
	Base	BGTC	20		Base	BGTC	20
	Sub-Base	BGS	20		Sub-Base	BGS	20
	Subleito	Solo	-		Subleito	Solo	-
B25_CA15	Revestimento	Concreto Asfáltico	15	SB25_CA15	Revestimento	Concreto Asfáltico	15
	Base	BGTC	25		Base	BGTC	25
	Sub-Base	BGS	25		Sub-Base	BGS	25
	Subleito	Solo	-		Subleito	Solo	-

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

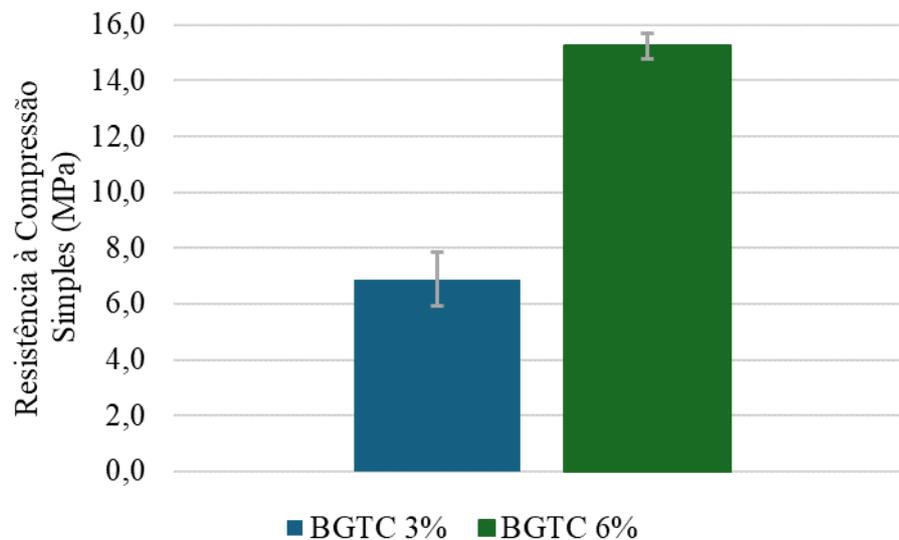
Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios conduzidos para avaliar as propriedades mecânicas da BGTC. Para a análise desses resultados, foram elaboradas tabelas que destacam os valores obtidos nos ensaios. Antes da criação destas tabelas, uma metodologia de triagem dos resultados foi aplicada, envolvendo o cálculo da média dos valores e a exclusão de quaisquer dados que estivessem fora do intervalo definido como média $\pm 10\%$. Esta abordagem foi adotada com o objetivo de mitigar a análise de dados que pudessem conter erros experimentais. É relevante ressaltar que os resultados apresentados representam a média de pelo menos duas amostras. Ensaios que não obtiveram aproveitamento de dados de pelo menos 2 amostras foram descartados. Além disso, também são apresentados os resultados do dimensionamento de um pavimento asfáltico utilizando camadas de BGTC.

4.1 ENSAIOS LABORATORIAIS

4.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Na Figura 5 são apresentados os resultados dos ensaios de RCS, para ambos os teores de cimento em massa. Além disso, os desvios padrão obtidos também podem ser observados.

Figura 5 - Resultados de resistência à compressão simples



Fonte: Autora

Sabe-se que distintos fatores afetam a resistência mecânica da BGTC. O teor de cimento, por exemplo, influencia diretamente na RCS, em que o aumento no teor proporciona um aumento nos valores obtidos. O acréscimo de 3 para 6% de cimento em massa na mistura aumentou a resistência em cerca de 120%. Este crescimento na resistência era esperado, conforme a revisão bibliográfica anteriormente introduzida.

Ainda, na Austrália e Nova Zelândia, a *Austroroads* classifica a ligação do material cimentado como "modificado" ou "estabilizado", dependendo da quantidade de cimento, o que resulta na melhoria no comportamento mecânico. Os critérios de classificação e aceitação do material pela agência (AUSTROADS, 2006) são determinados utilizando parâmetros de RCS, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação dos materiais cimentados de acordo com a RCS

Classificação	Resistência à Compressão Simples - RCS (MPa)
Modificado	$0,7 < RCS < 1,5$
Levemente Modificado	$1,5 < RCS < 3,0$
Cimentado (estabilizado)	$RCS > 3,0$
Concreto Magro	$6,0 < RCS < 15,0$

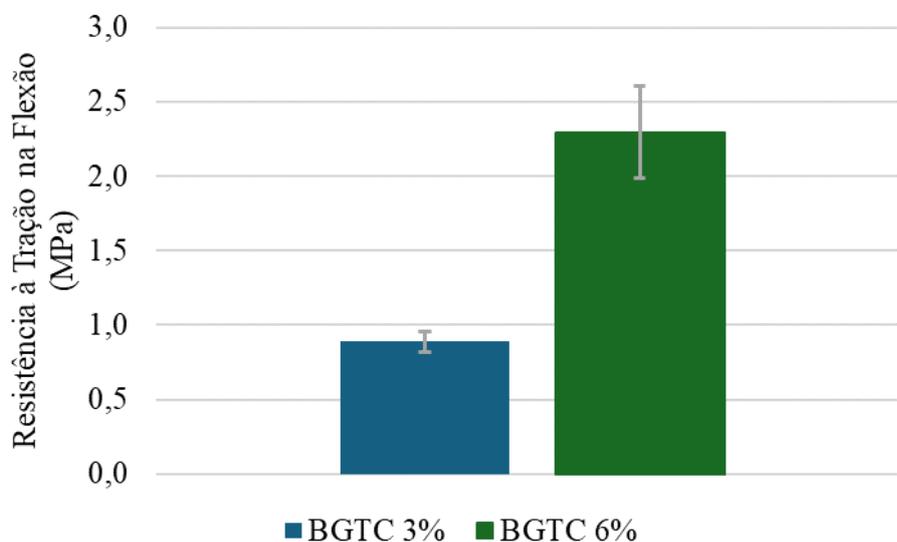
Fonte: *Austroroads* (2006)

Considerando que os resultados de RCS para ambos os teores de cimento estudados foram superiores à 6 MPa, é possível classificar esta BGTC como sendo um concreto magro.

4.1.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (RTF)

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram conduzidos considerando um período de cura de 28 dias. Para cada composição, três corpos de prova prismáticos foram moldados e testados, e os resultados foram analisados levando em consideração os três parâmetros mencionados. Os resultados obtidos através dos ensaios de RTF podem ser visualizados na Figura 6.

Figura 6 - Resultados de resistência à tração na flexão



Fonte: Autora

Assim como observado na RCS, houve aumento entre os valores de RTF, conforme o incremento no teor de cimento. O acréscimo de 3 para 6% de cimento em massa na mistura aumentou a resistência em cerca de 150%. Este crescimento na resistência era esperado, conforme a revisão bibliográfica anteriormente introduzida.

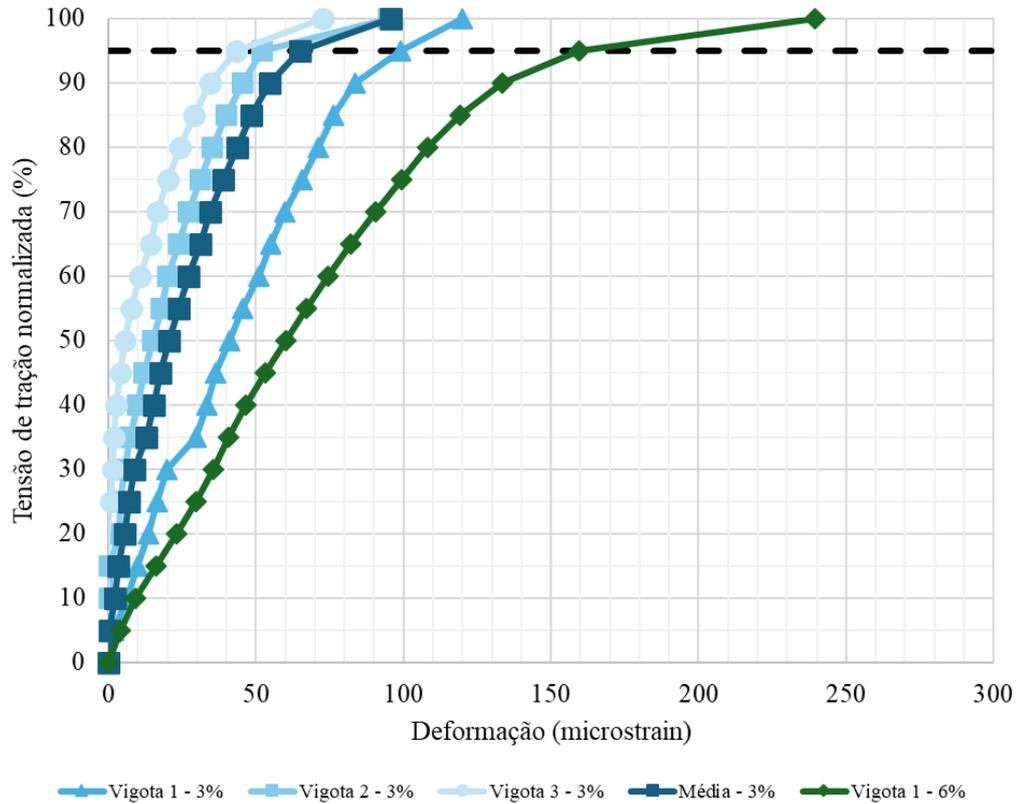
4.1.2.1 DEFORMAÇÃO NA RUPTURA

Além da avaliação da resistência à tração na flexão, foram determinados os módulos de elasticidade na flexão e a deformação na ruptura, que são critérios relevantes no dimensionamento mecânico empírico.

Para definir a deformação na ruptura, calcularam-se as tensões de tração normalizadas para cada corpo de prova ensaiado, dividindo as tensões aplicadas pela RTF da amostra. Isso permitiu analisar a deformação gerada para cada valor de tensão normalizada, variando de 0% a 100% em intervalos de 5%. Ao relacionar esses dados, obteve-se uma curva representativa do material testado. Conforme explicado na seção 3.2.2.1, a deformação na ruptura corresponde a 95% da tensão de tração normalizada. A Figura 7 mostra as curvas médias para cada mistura,

identificando os pontos relacionados à deformação na ruptura, e os resultados são resumidos na Tabela 5.

Figura 7 - Curvas de tensão de tração normalizadas por deformação



Fonte: Autora

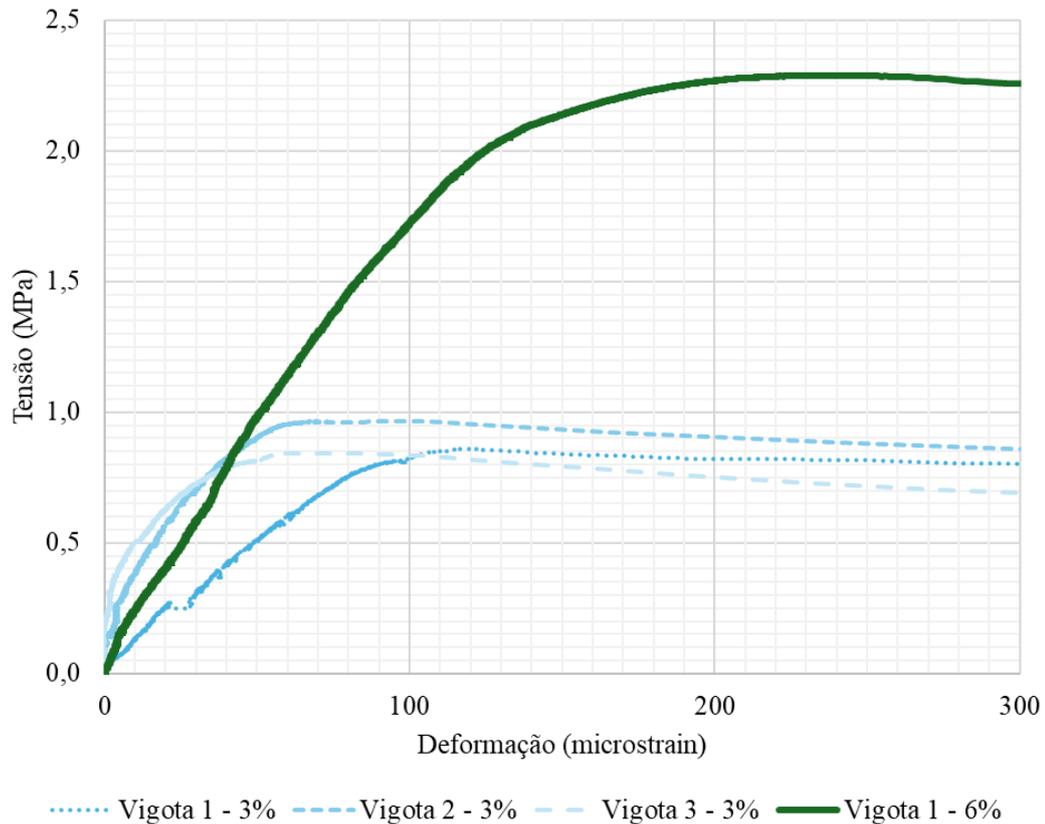
Tabela 5 - Deformação na ruptura, de acordo com o teor de cimento

Material	ε _{ruptura} média (μstrain)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC 3% cimento em massa	65	30	46,5%
BGTC 6% cimento em massa	160	-	-

Como é possível observar na Figura 8, para o material utilizando 3% de cimento em massa, as vigotas 2 e 3 tiveram um comportamento elástico semelhante, enquanto a vigota 1 divergiu nos

resultados. Por conta disso, houve um grande desvio padrão entre os valores obtidos para a deformação de ruptura.

Figura 8 - Curvas de tensão por deformação



Fonte: Autora

Para o material utilizando 6% de cimento em massa, por conta de problemas durante o posicionamento do LVDT, somente foi possível considerar um dos corpos de prova ensaiados, a vigota 1. Além disso, o valor de deformação na ruptura obtido para este teor de cimento não correspondeu ao esperado para o material, em comparação ao teor mais baixo, uma vez que com o incremento de cimento a deformação na ruptura deveria ser menor, conforme revisão bibliográfica. Pelos motivos citados, decidiu-se por descartar os dados referentes ao teor de 6% de cimento para as próximas análises desta pesquisa.

4.1.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO (MEF)

Por se tratar de um material cimentado, percebeu-se um padrão muito sensível, com grandes variações do MEF, inclusive, entre amostras do mesmo teor de cimento. Para o material utilizando 3% de cimento em massa, foi necessário, calcular o MEF através da secante entre os pontos de 30% e 60% da RTF, pois apresentavam uma inclinação mais semelhante entre si,

quando visualizadas individualmente. Após, calculou-se a média entre elas, obtendo o valor para o MEF de 18681 MPa.

Para o material utilizando 6% de cimento em massa, por conta de problemas durante o posicionamento do LVDT, somente foi possível considerar um dos corpos de prova ensaiados, a vigota 1, que obteve um MEF correspondente a 17105 MPa. Este dado foi, então, descartado, visto que também não correspondeu ao comportamento esperado para o material, no qual o valor do MEF aumentaria com o incremento no teor de cimento, conforme revisão bibliográfica.

4.2 DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO COM CAMADAS DE BGTC

A partir dos dados obtidos, foi dimensionado um pavimento hipotético, analisando a camada referente à BGTC. Foi considerado o comportamento elástico linear, no qual o programa leva em conta o valor do módulo de elasticidade (MEF). É importante ressaltar que é necessário empregar o comportamento linear para o dimensionamento das camadas cimentadas uma vez que a calibração do método de dimensionamento mecânico na República da África do Sul, utilizado nesta pesquisa, utiliza dados de tração na flexão. Esta abordagem é resultado da necessidade de adaptar o modelo às condições específicas observadas em campo, considerando que o método foi originalmente calibrado utilizando o MEF. Ao adotar o comportamento linear, é possível considerar de forma eficaz os parâmetros mecânicos e de resistência do solo, proporcionando uma análise mais confiável e uma estrutura mais segura para as camadas cimentadas.

Definidas as estruturas conforme o item 3.2.2.5, o próximo passo foi selecionar os materiais para as outras camadas. Desta forma, optou-se por uma camada de revestimento utilizando um concreto asfáltico do banco de dados original do MeDiNa; para as camadas de material granular, optou-se por uma brita graduada simples (BGS) estudada por Malysz (2009); para as camadas de BGTC, utilizou-se o material cimentado objeto de estudo desta pesquisa; para o subleito, utilizou-se um solo qualquer, com valores típicos da literatura.

As características mostradas na Tabela 6 são parâmetros de entrada no software empregado nas análises. Os coeficientes de Poisson são sugeridos pelo software AEMC. Considerou-se existente a aderência entre as camadas.

Tabela 6 - Parâmetros das camadas estudadas

Camada	Material	Massa Esp. (g/cm ³)	Módulo (MPa)	k1	k2	k3	Coefficiente de Poisson
Revestimento	Concreto Asfáltico	2,4	8000	-	-	-	0,30
Material Cimentado	BGTC	2,326	18681	-	-	-	0,35
Material Granular*	BGS	2,65	-	2303	0,223	0,759	0,35
Subleito	Solo	1,6	-	34,09	-0,037	-0,406	0,45

*Malysz (2009)

Após estabelecer as configurações das estruturas e caracterizar os materiais envolvidos, foram conduzidas as análises mecânicas. Para cada estrutura, determinou-se a capacidade de suportar volume de tráfego, expressa por um número N_{AASHTO} , associado a um mecanismo específico de ruptura, através das equações expressas no item 3.2.2. O objetivo foi avaliar o

comportamento do material aplicado nas camadas de base e sub-base e verificar se há diferença significativa entre elas.

A fim de potencializar os resultados dessas análises, escolheu-se dividi-las nas estruturas delineadas nas Tabelas 3. Os resultados são então apresentados considerando duas diferentes espessuras para as camadas cimentadas e para a camada de concreto asfáltico, e o impacto dessa variação é discutido no item 4.3.

Para todas as estruturas estudadas, os mecanismos de ruptura analisados foram: vida de fadiga da camada de concreto asfáltico (N_f), esmagamento avançado (N_{ea}), vida de fadiga efetiva (N_{fe}), ambos para a camada cimentada, resistência ao cisalhamento (N), para a camada de material granular e deformação permanente (N_{dp}) do subleito.

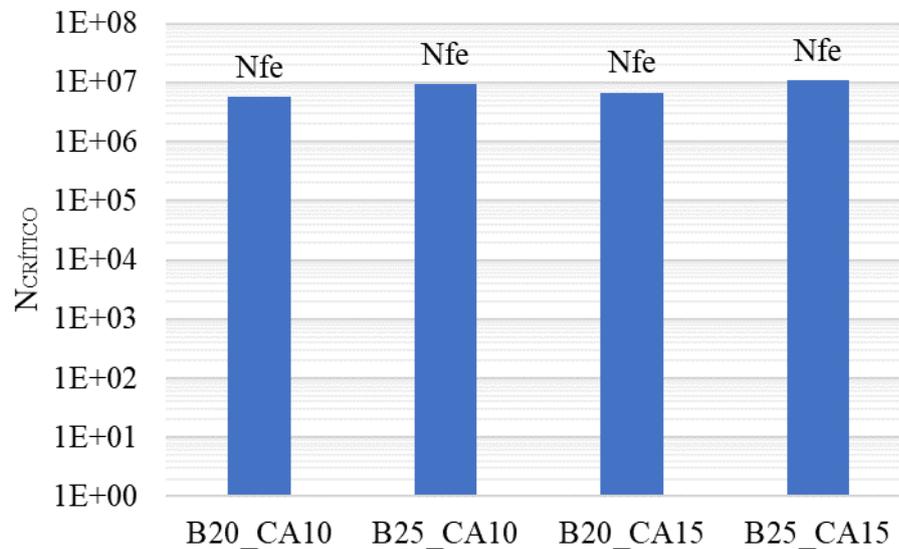
4.2.1 ESTRUTURAS COM CAMADA DE BASE UTILIZANDO BGTC

Foi feita uma comparação nas estruturas semirrígidas diretas, utilizando camada de base com BGTC. Na Tabela 7 é possível observar os valores de N encontrados para cada mecanismo de ruptura analisado. Ao dimensionar estruturas com camada de base em BGTC, observou-se que o módulo utilizado na camada cimentada era significativamente maior do que na camada de concreto asfáltico, tornando a base excessivamente rígida e levando a deformações por compressão no revestimento. Isso sugere que o $N_{crítico}$ não ocorreria devido à fadiga do concreto asfáltico. Além disso, a resistência ao cisalhamento da camada de material granular na sub-base apresentou valores tão altos que tenderam ao infinito, indicando uma alta rigidez da camada de base cimentada e sugerindo poucos riscos de deformação para a camada de material granular. As siglas apresentadas acima dos resultados de número $N_{crítico}$ na Figura 9 identificam os mecanismos de degradação que devem levar à ruptura do pavimento.

Tabela 7 - Valores de N para cada mecanismo de ruptura das camadas de base em BGTC

	B20_CA10	B25_CA10	B20_CA15	B25_CA15
N_f	-	-	-	-
N_{ea}	1,45E+08	1,45E+08	1,48E+08	1,47E+08
N_{fe}	5,81E+06	9,62E+06	6,85E+06	1,08E+07
N	∞	∞	∞	∞
N_{dp}	3,28E+21	3,45E+24	2,19E+23	8,08E+15

Figura 9 - Resultados das análises das estruturas com camada de base em BGTC, considerando seu $N_{\text{crítico}}$



A Figura 9 revela que o mecanismo de degradação correspondente ao menor número N_{AASHTO} das estruturas com camada de base em BGTC foi a vida de fadiga efetiva da camada de BGTC. É importante ressaltar que quando este mecanismo de degradação acontece, o valor crítico do N_{AASHTO} resultante das análises não indica incapacidade total do pavimento de manter condições adequadas para o tráfego. Isso ocorre porque, quando a camada cimentada está totalmente fissurada, ela assume um comportamento equivalente ao de um material granular, conforme detalhado no item 3.2.2.3.

No momento atual da pesquisa, não há disponibilidade de módulos de camadas de BGTC completamente fissuradas. Assim, em prol da segurança, essa adição não foi levada em consideração. Por conta disto, considerar-se-á a vida de fadiga efetiva como o mecanismo de degradação final destas estruturas.

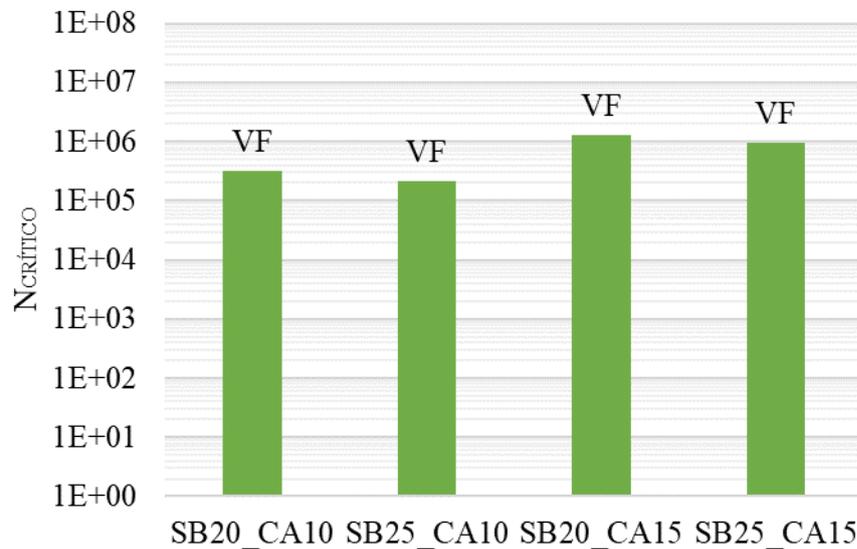
4.2.2 ESTRUTURAS COM CAMADA DE SUB-BASE UTILIZANDO BGTC

Foi feita uma comparação nas estruturas semirrígidas inversas, utilizando camada de sub-base com BGTC. Na Tabela 8 é possível observar os valores de N encontrados para cada mecanismo de ruptura analisado. As siglas apresentadas acima dos resultados de número $N_{\text{crítico}}$ na Figura 10 identificam os mecanismos de degradação que devem levar à ruptura do pavimento.

Tabela 8 - Valores de N para cada mecanismo de ruptura das camadas de sub-base em BGTC

	SB20_CA10	SB25_CA10	SB20_CA15	SB25_CA15
Nf	3,23E+05	2,16E+05	1,27E+06	9,47E+05
Nea	1,51E+08	1,51E+08	1,52E+08	1,52E+08
Nfe	7,91E+06	1,27E+07	8,99E+06	1,38E+07
N	2,39E+27	5,15E+26	2,77E+42	3,53E+43
Ndp	7,24E+16	2,68E+18	6,45E+17	1,86E+19

Figura 10 - Resultados das análises das estruturas com camada de sub-base em BGTC, considerando seu $N_{\text{crítico}}$



A Figura 10 revela que o mecanismo de degradação primário para a camada de sub-base utilizando BGTC foi a vida de fadiga da camada de concreto asfáltico. Este mecanismo refere-se à capacidade do concreto asfáltico de suportar ciclos repetidos de carga e descarga sem desenvolver danos permanentes, como trincas e deformações. Nesse contexto, a vida de fadiga é influenciada pela qualidade e resistência das camadas de concreto asfáltico, base granular e sub-base cimentada, bem como pela distribuição eficiente das tensões ao longo do sistema pavimentar. A capacidade de transferência de carga entre as camadas é essencial para garantir uma distribuição uniforme das tensões e evitar concentrações de esforços que possam levar a danos prematuros, como trincas e deformações.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES ACERCA DO DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO COM CAMADAS DE BGTC

As análises mecânicas desenvolvidas permitiram compreender e quantificar o impacto no dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos com camadas de material cimentado, considerando diferentes aplicações do material estudado.

Para o dimensionamento de estruturas com camada de base, percebeu-se, ao realizar os cálculos do $N_{\text{crítico}}$, que o módulo utilizado na camada cimentada era imensamente maior do que o módulo utilizado para a camada de concreto asfáltico, o que tornou a camada de base demasiadamente rígida, ocasionando o retorno de valores de deformação por compressão na fibra inferior do revestimento asfáltico. Por conta disso, considerou-se que o $N_{\text{crítico}}$ não ocorreria devido à fadiga da camada de concreto asfáltico.

Ainda, ao analisar a resistência ao cisalhamento da camada de material granular empregado na sub-base destas estruturas, os valores obtidos para o N foram tão grandes que tenderam ao infinito. Este resultado enfatiza a alta rigidez da camada de base cimentada, sugerindo que a camada de material granular não está sujeita a riscos significativos de deformação.

Em outra perspectiva, percebeu-se que, em relação ao dimensionamento considerando camada de sub-base com material cimentado, retornou-se o mecanismo de ruptura como sendo a vida de fadiga da camada de concreto asfáltico. Segundo o SAPEM (2014), a concepção do pavimento invertido reside no fato de que a camada cimentada oferece uma sub-base sólida, contra a qual a base granular pode ser bem compactada, gerando uma base densa e de alta qualidade. Como consequência, percebem-se valores mais baixos para a resistência ao cisalhamento destas camadas granulares, conforme visto na Tabela 8, em comparação com a Tabela 7.

Ademais, observa-se que os valores para o $N_{crítico}$ das camadas de base têm um coeficiente de variação de 28%, enquanto para as camadas de sub-base este valor atinge 73%, conforme observado nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Resultados de $N_{crítico}$ para as estruturas com camada de base em BGTC

Média $N_{crítico}$	Desvio Padrão $N_{crítico}$	Coefficiente de Variação (%)	Estrutura $N_{crítico}$ Máx	Estrutura $N_{crítico}$ Mín
8,27E+06	2,32E+06	28%	B25_CA15	B20_CA10

Tabela 10 - Resultados de $N_{crítico}$ para as estruturas com camada de sub-base em BGTC

Média $N_{crítico}$	Desvio Padrão $N_{crítico}$	Coefficiente de Variação (%)	Estrutura $N_{crítico}$ Máx	Estrutura $N_{crítico}$ Mín
6,88E+05	5,02E+05	73%	SB20_CA15	SB25_CA10

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo contribuir para os estudos acerca da brita graduada tratada com cimento, especialmente no estudo de resistências e rigidez deste material cimentado. Os valores de resistência à compressão simples (RCS) aumentam conforme o acréscimo de cimento, assim como os valores para a resistência à tração na flexão (RTF). Contudo, nota-se que os valores de módulo de elasticidade na flexão e deformação na ruptura entre os dois teores estudados não seguiram o esperado, quando comparados com dados da literatura.

Durante o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, foi investigado o impacto do dimensionamento de camadas cimentadas, conforme sua utilização. É evidente que essa escolha influencia de maneira significativa a análise e a concepção dessas estruturas, principalmente no que diz respeito às camadas de base.

Foi observado que as camadas de base convergiram para um único mecanismo de degradação, sendo este a vida de fadiga efetiva da camada cimentada, com valores para o $N_{crítico}$ muito próximos entre si.

Em consonância, para as camadas de sub-base, a análise dos dados também convergiu para um mesmo mecanismo de ruptura, porém este sendo a vida de fadiga da camada de concreto asfáltico. No entanto, mesmo com esse comportamento unificado, observou-se uma disparidade nos valores do $N_{crítico}$, tendo um coeficiente de variação de 73% entre as estruturas analisadas. Em suma, este estudo destacou a importância de uma análise criteriosa e abrangente ao selecionar o tipo de estrutura para o dimensionamento de pavimentos asfálticos, ressaltando a

necessidade de considerar não apenas as propriedades dos materiais, mas também o comportamento esperado da estrutura como um todo.

Quanto à definição dos teores de cimento estudados nesta pesquisa, tendo em vista que o acréscimo de cimento torna a mistura mais rígida, sugere-se avaliar o comportamento mecânico referente a teores de cimento mais baixos.

Considerando o comportamento frágil percebido na mistura, sugere-se a moldagem de mais corpos de prova para um mesmo teor de cimento. Por conta da grande variação dos resultados obtidos, a moldagem de apenas 3 corpos de prova se mostrou insuficiente para um bom entendimento do comportamento mecânico da BGTC.

Dada a vasta variação de resultados revelada neste estudo, é proposto que os resultados sejam analisados utilizando medianas em vez de médias aritméticas. Isso se deve ao fato de que a média aritmética pode ocultar resultados e ser influenciada por valores discrepantes, distorcendo os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM INTERNATIONAL. **D1635/D1635M-12: Standard Test Method for Flexural Strength of Soil-Cement Using Simple Beam with Third-Point Loading**. Estados Unidos, 2012.

ANDRADE, L. R.; KUCHIISHI, A. K.; BESSA, I. S.; BERNUCCI, L. L. B.; BEJA, I. A.; CHAVES, J. M. **Comportamento mecânico de camadas de bases granular e tratada com cimento em rodovia de tráfego muito pesado**. XXIX ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Ouro Preto, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579: Determinação da finura do cimento**. Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11803: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland**. Rio de Janeiro, 2018b.

AUSTROADS. **AGPT04D/06: Guide to Pavement Technology Part 4D: Stabilised Materials**. Austrália, 2006.

AUSTROADS. **AP-T101/08: The development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterization of Cemented Materials**. Austrália, 2008.

BALBO, J. T. **Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura**. Revista Transportes, v. XIV, n.1, p.45-53, junho, 2006.

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

BERNUCCI, L. L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

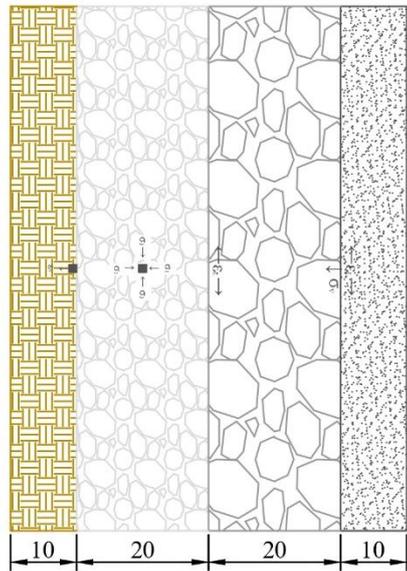
CARVALHO, J.; CASTELO-BRANCO, F.; QUINTA-FERREIRA, M. **Grading influence in compaction of granular layers of road pavements**. Revista Comunicações Geológicas, v.III, p.1101-1105. Porto, Portugal, 2014.

- CERVO, T. C.; BALBO, J. T.; BADAWY, M.; SEVERI, A. A. **Influence of curing procedures and porosity in the flexural resistance of concretes for paving.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.3, n.4, dezembro, 2010.
- CHAKRABARTI, S.; KODIKARA, J. **Basaltic crushed rock stabilized with cementitious additives: compressive strength and stiffness, drying shrinkage, and capillary flow characteristics.** Transportation Research Record, n.1819, p.18–26, janeiro, 2003.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ – DER/PR. **ES-P 07/05: Pavimentação – camadas estabilizadas granulometricamente.** Paraná, 2005.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ – DER/PR. **ES-P 16/18: Pavimentação – brita graduada tratada com cimento.** Paraná, 2018.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER/SP. **ET-DE-P00/009: Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento – BGTC.** São Paulo, 2005.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **NORMA RODOVIÁRIA DNER-EM 036/95: Cimento – recebimento e aceitação.** 1995.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **NORMA RODOVIÁRIA DNER-ME 091/98: Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **NORMA RODOVIÁRIA DNER-ME 162/94: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.** 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **NORMA DNIT 181/2018 – ME: Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.
- ESPECIFICAÇÕES CCR. **EN-000/00-0000.00-GER-A1-PV/ES-E-013-R7: Especificação particular – brita graduada tratada com cimento.** 2002.
- FEDRIGO, W. et al. **A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests.** Construction and Building Materials, v.171, p.161-169, maio, 2018.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – JSCE. **SF4 Method of Test For Flexural Strength and Flexural Toughness.** Japão, 1984.
- KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C. **Estudo da Influência do Teor de Cimento Portland, da Energia de Compactação e da Umidade no Comportamento Mecânico da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados.** Relatório. Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) e Concessionária CCR Nova Dutra, Grupo CCR, Rio de Janeiro, 2015.
- LCPC. **Catalogue des structures de chaussees. Guide technique pour l'utilisation des materiaux regionaux d'Ile-de-France.** 1994.
- LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G. **Influência da variação granulométrica de brita graduada simples na deformação permanente.** XXIX ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Ouro Preto, 2015.
- LÓPEZ, M. A. C. **Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento Portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos.** 2016, 163 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- MALYSZ, R. **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 350 p., 2009.

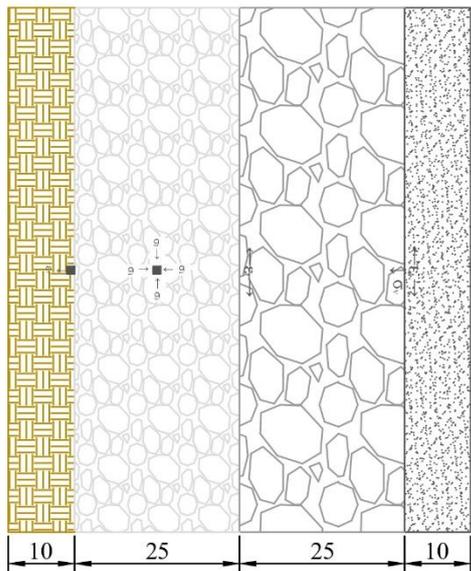
- NASCIMENTO, R. S.; ALBUQUERQUE, F. S. **Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE**. Revista Transportes, v.26, n.1, abril, 2018.
- NUNES, V. J. M. B; ALBUQUERQUE, F. S. **Influência do tipo de cimento nas características mecânicas da brita graduada tratada com cimento**. XXXV ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, novembro, 2021.
- NEVADA D.O.T. (DEPARTMENT OF TRANSPORTATION). **Standard Specifications for Road and Bridge Construction**. Carson City, NV. 2014.
- OKLAHOMA D.O.T. (DEPARTMENT OF TRANSPORTATION). **OHD L-53 – Method of Test for Cement Treated Base Mix Design**. Oklahoma, 2013.
- PAIXÃO, M. P.; CORDEIRO, C. C. C.; CORREIA, M. C. N. **Pavimentos semirrígidos: prevenção e tratamento da reflexão de trincas**. XVI SEPA – Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, UNIFACS, 2017.
- PAUL, D. K., GNANENDRAN, C. T. **Characterisation of Lightly Stabilised Granular Base Materials by Flexural Beam Testing and Effects of Loading Rate**. Geotechnical Testing Journal, v.35, n.5, p.1-12, 2012.
- PRADO, K. **Estudo de critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento**. 2018, 161 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.
- RODRIGUES, R. M. **Engenharia de pavimentos – Parte 1: Projetos de Pavimentos**. Porto Alegre: Padda Comunicação, 2020.
- SILVA, L. M.; SANTOS, R. O. G. **Comparative study: empirical method of DNIT and mechanistic-empirical (Medina) in the design of flexible pavements**. Engineering Sciences, v.9, n.1, p.114-124, 2021.
- SILVEIRA, F. W. **Avaliação do comportamento mecânico de uma BGTC com diferentes teores de cimento**. 2023. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.
- SOLIANI, R. D. **Dimensões da sustentabilidade no transporte rodoviário de cargas no Brasil**. VII Congresso de Ciência e Tecnologia do IFAC, Rio Branco, 2022.
- SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY SOC LTD. **South African Pavement Engineering Manual**. 2.ed. República da África do Sul, 2014.
- SUNIL, S.; VARUNA, M.; NAGAKUMAR, M. S. **Performance evaluation of semi rigid pavement mix**. Materials Today: Proceedings, v.46, parte 10, p.4771-4775, agosto, 2021.
- SUZUKI, C.Y. **Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (sub-base cimentada)**. 1992. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- YEO, Y. S.; JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. **Mix design of cementitious basecourse**. ICAGE – International Conference on Advances in Geotechnical Engineering. Curtin University Department of Civil Engineering. Perth, W. A, novembro, 2011.

ANEXO A

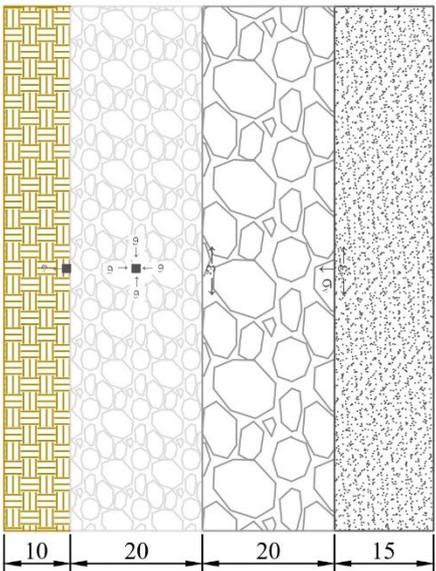
BASE B20_CA10



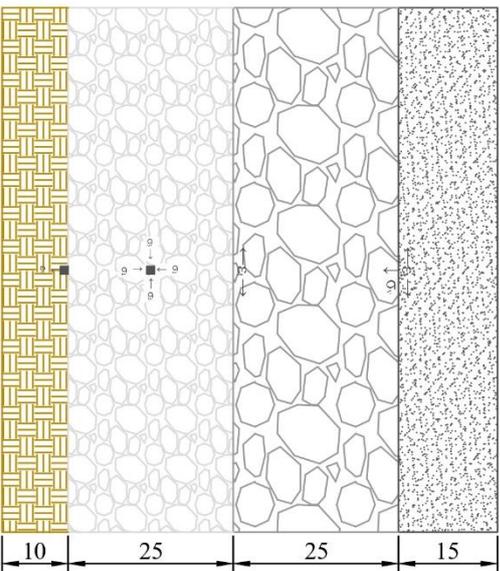
BASE B25_CA10



BASE B20_CA15



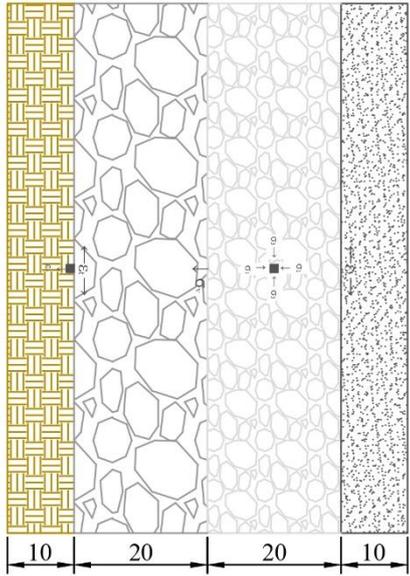
BASE B25_CA15



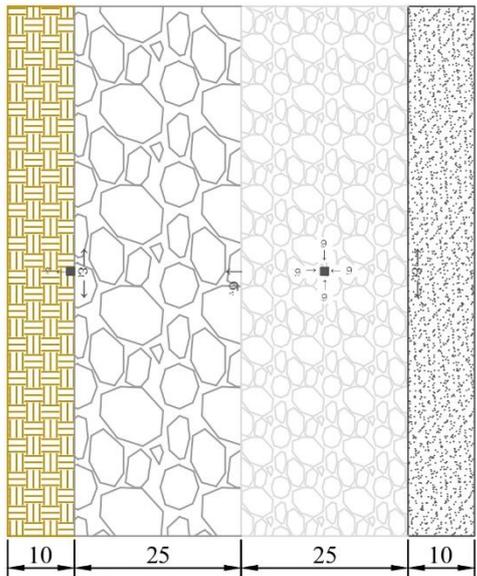
-  Concreto Asfáltico
-  BGTC
-  BGS
-  Solo

Instituição:		UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL	
Projeto:		TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	
Proprietário:		Márcia Leuzi Cardoso	
	Previdido:	Escala:	
	Base: BGTC		1:1
	Data: 15/02/24	Folha:	1/2

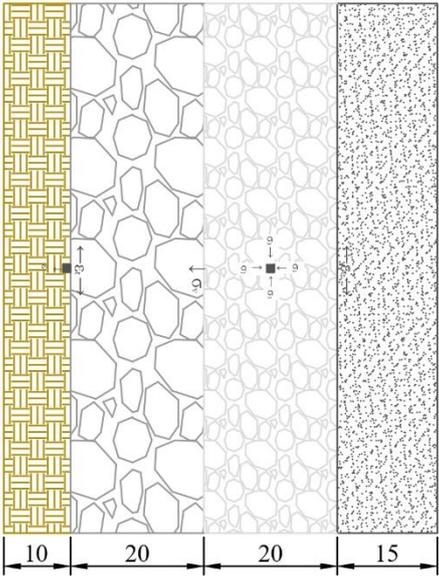
SUB-BASE SB20_CA10



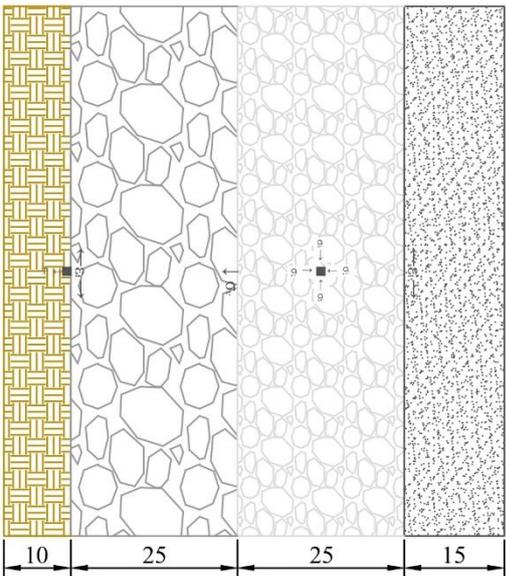
SUB-BASE SB25_CA10



SUB-BASE SB20_CA15



SUB-BASE SB25_CA15



-  Concreto Asfáltico
-  BGT
-  BGS
-  Solo

Instituição			
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL			
Projeto			
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO			
Proponente			
Júlia Lenzi Cardoso			
Domínio		Escala	
Sub-base BGT		1:1	
Folha		2/2	
Data		15/02/24	