

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

FERNANDA WILSON SILVEIRA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA BGTC COM
DIFERENTES TEORES DE CIMENTO**

Porto Alegre
Setembro 2023

FERNANDA WILSON SILVEIRA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA BGTC COM
DIFERENTES TEORES DE CIMENTO**

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

Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito
Coorientadora: Thaís Radünz Kleinert

Porto Alegre
Setembro 2023

FERNANDA WILSON SILVEIRA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA BGTC COM
DIFERENTES TEORES DE CIMENTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador, pela professora coorientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, setembro de 2023

ORIENTADOR

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (UFRGS)
Ph.D. pela University of Nottingham

COORIENTADORA

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

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Lucas Delongui (UFSM)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha mãe, Andréia, e ao meu pai Manoel Henrique, por serem meus alicerces e guias aos longos de toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

À medida que chego ao final desta jornada, quero expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização desse sonho. Essa conquista não teria sido possível sem o apoio, orientação e amor de tantas pessoas especiais em minha vida.

Primeiramente aos meus pais Andréia e Manoel Henrique, obrigada por me incentivarem, me apoiarem e acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores. Sua paciência e compreensão foram inestimáveis. Cada conquista que alcancei é, em grande parte, um reflexo de sua dedicação como pais. Suas lições de vida sobre persistência, resiliência e valores moldaram meu caráter e me deram as ferramentas para superar as dificuldades acadêmicas e pessoais.

Aos Meus Amigos, que estiveram ao meu lado em cada etapa desta jornada, obrigado por serem minha fonte de alegria, motivação e inspiração. Suas palavras de encorajamento e apoio fizeram toda a diferença.

Meu namorado Rodrigo, seu amor e compreensão foram um refúgio constante em meio ao estresse e às incertezas deste processo. Sua fé em mim e seu apoio inabalável tornaram cada desafio mais fácil de superar.

Às pessoas que contribuíram para minha pesquisa, bolsistas, mestrandos, doutorandos, técnicos e estagiários do laboratório LAPAV seu valioso tempo, insights e conhecimentos foram fundamentais para o sucesso deste projeto. Sem a sua colaboração e generosidade, este trabalho não teria alcançado seus objetivos.

Ao Meu Orientador Lélcio Brito, e a minha Coorientadora Thaís Kleinert, a orientação, a expertise e o compromisso com minha formação acadêmica foram cruciais. Suas críticas construtivas e direcionamento me ajudaram a crescer como pesquisadora e a aprimorar meus conhecimentos.

Além disso, não posso deixar de expressar minha profunda gratidão pelas políticas de inclusão por cotas. Para alguém oriundo do sistema público de ensino, essas medidas revelaram-se absolutamente cruciais, ou melhor, essenciais para que eu pudesse realizar meu tão almejado sonho de ingressar no ensino superior.

A todos vocês, minha gratidão é eterna. Este título é uma celebração de nossos esforços conjuntos e do amor que compartilhamos. Obrigado por fazerem parte desta jornada e por me ajudarem a alcançar este marco importante em minha vida.

“Não tinha nem ideia de que estava fazendo história.
Só estava cansada de me render.”

Rosa Parks

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas granulométricas sugeridas para execução de BGTC.....	14
Figura 2 – Curvas granulométricas sugeridas e curva adotada para mistura	17
Figura 3 – Equipamentos utilizados na moldagem dos CPs: Soquete Marshall, Soquete vibratório e Molde	20
Figura 4 – Prensa de execução do ensaio de RCD	21
Figura 5 – Equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral	21
Figura 6 – Preparo das amostras e realização do ensaio	23
Figura 7 – Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD) aos 7 e 28 dias	23
Figura 8 – Gráfico de Efeitos Principais: Ensaio de RCD	23
Figura 9 – Gráfico de Contorno: Ensaio de RCD	23
Figura 10 – Relação entre RCD e MRD aos 7 e aos 28 dias.....	25
Figura 11 – Resultado Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial (MRT) aos 7 dias e 28 dias DNIT 181 (2018)	26
Figura 12 – Resultado Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial (MRT) em função de teta (θ) aos 7 dias e 28 dias DNIT 134 (2018)	26
Figura 13 – Comparação de valores de RCD aos 7 e aos 28 dias (MPa)	26
Figura 14 – Comparação de valores de MRD aos 7 e aos 28 dias (MPa).....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física do cimento utilizado na pesquisa.	18
---	----

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Bases Granulares Tratadas com Cimento	12
2.2 Granulometria das Misturas de Brita Graduada Tratada com Cimento	13
2.3 Parâmetros de Compactação	14
2.4 Propriedades mecânicas relevantes	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 Materiais	17
3.1.1 Agregados	17
3.1.2 Cimento Portland	18
3.1.3 Mistura de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	18
3.2 Métodos	19
3.2.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD)	20
3.2.2 Módulo de Resiliência por Compressão Diametral (MRD)	21
3.2.3 Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial (MRT)	22
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	23
4.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD)	23
4.2 Módulo de Resiliência por Compressão Diametral (MRD)	25
4.3 Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial (MRT)	26
4.4 Comparação dos Resultados com Referências Bibliográficas	28
5. CONCLUSÕES	29
REFERÊNCIAS	29

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA BGTC COM DIFERENTES TEORES DE CIMENTO

MECHANICAL BEHAVIOR EVALUATION OF A CTGB WITH DIFFERENT CEMENT CONTENT

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo a avaliação do efeito do teor de cimento nas propriedades mecânicas de uma brita graduada tratada com cimento (BGTC) utilizada em uma obra de duplicação. O cimento utilizado foi o CP II-Z 40, variando de 1 a 6%. Após a compactação das amostras, as mesmas foram curadas por 7 e 28 dias de cura e ensaiadas para determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD), do Módulo de Resiliência por Compressão Diametral (MRD) e do Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial (MRT). Os resultados de RCD demonstram que há um aumento na resistência à tração das misturas, com o aumento do teor de cimento e do tempo de cura. Em relação aos resultados de MRD, destaca-se que apenas foi possível realizar o ensaio para o teor de cimento de 6%, uma vez que amostras com menores teores de cimento apresentaram resistências incompatíveis com o ensaio. Observou-se um aumento de aproximadamente 22% nos valores de RCD e MRD, ao comparar os resultados de 7 e 28 dias. Por fim, os ensaios de MRT realizados para a mistura de projeto, composta de 3% de cimento, quando avaliados pelo método de ensaio 181 (DNIT, 2018b), demonstraram que não há grandes variações de resultados entre os tempos de cura estudados. Ao avaliar a mistura pelo método de ensaio 134 (DNIT, 2018a), observou-se uma significativa variação nos valores de MRT. Diferentemente do observado nos demais ensaios (RCD, MRD), os valores obtidos nos ensaios de MRT reduziram conforme o aumento do tempo de cura.

Palavras-chave: Brita Graduada Tratada com Cimento; Resistência à Tração; Módulo de Resiliência.

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the effect of cement content on the mechanical properties of cement treated granular base (CTGB), used in a new carriageway implementing an existing road segment. CP II-Z 40 cement was utilized, ranging from 1% to 6% in content. After compacting the samples, they were subjected to curing periods of 7 and 28 days and tested for Indirect Tensile Strength (ITS), Diametral Compression Modulus (IDT RM) and Triaxial Resilience Modulus (TRM) determination. The ITS results demonstrate an increase in the tensile strength in the mixtures with higher cement content and longer curing times. Regarding the IDT RM results, it is noteworthy that the test could only be conducted for the 6% cement content, as samples with lower cement content displayed strengths incompatible with the test. There was an approximately 22% increase in both ITS and IDT RM values when comparing the results at 7 and 28 days of curing. Finally, the TRM tests performed on the project mixture, consisting of 3% cement, when evaluated using test method 181 (DNIT, 2018b), showed no significant variations in results between the studied curing times. However, when evaluating the mixture using test method 134 (DNIT, 2018a), a substantial variation in TRM values was observed. In contrast to the observations in other tests (ITS and IDT RM), the values obtained in the TRM tests decreased as the curing time increased.

Keywords: Cement Treated Granular Base; Tensile Strength; Resilience Modulus.

1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária desempenha um papel crucial no desenvolvimento e conectividade das sociedades modernas. O pavimento é uma estrutura que suporta e distribui os esforços causados pelo tráfego, visando melhorar as condições de rolamento, conforto e segurança, além de aumentar a durabilidade da superfície. Existem três tipos principais de pavimentos: rígidos, flexíveis e semirrígidos, cada um com sua estrutura específica e materiais. Este estudo se concentra na análise das camadas de base e sub-base, com o emprego de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). Essas camadas desempenham um papel fundamental na distribuição das cargas do tráfego e na sustentação da superfície de rolamento.

No entanto, materiais granulares, como solos e britas, não exibem resistência à tração substancial, tornando desnecessária a análise desse parâmetro. Para materiais com coesão, como asfaltos e materiais cimentados, como a BGTC, a resistência à tração desempenha um papel significativo, uma vez que avalia a capacidade da mistura de suportar tensões de tração, replicando as condições reais de carga durante o tráfego.

Em contrapartida, o módulo de resiliência assume importância, especialmente porque simula as condições às quais o material estará sujeito em campo, como carregamentos cíclicos. A relevância do módulo de resiliência está intimamente relacionada ao entendimento do comportamento na estrutura do pavimento, desempenhando um papel fundamental no dimensionamento e na avaliação estrutural do pavimento.

A BGTC desempenha um papel relevante na construção de estradas modernas, proporcionando benefícios significativos. A adição da camada cimentada reduz as tensões de tração na camada asfáltica, permitindo uma diminuição na quantidade de material asfáltico necessário em comparação com pavimentos flexíveis convencionais equivalentes (Suzuki, 1992).

Um dos aspectos relevantes no desempenho da BGTC é o teor de cimento utilizado na mistura. O ajuste desse teor pode influenciar diretamente as características mecânicas do material, como resistência e rigidez, impactando diretamente no desempenho do pavimento. Neste contexto, o objetivo deste estudo consiste em analisar os efeitos, tanto do teor de cimento, quanto do tempo de cura na resistência à tração. Adicionalmente, visa-se investigar especificamente a variação da rigidez ao longo de diferentes tempos de cura em misturas de BGTC.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para um melhor entendimento, tanto dos parâmetros da BGTC, quanto para sua aplicação em pavimentação rodoviária, este tópico apresenta referências e estudos já realizados. É abordada a conceituação teórica, bem como os aspectos de dosagem. Além disso, é discutida a influência dos constituintes da mistura no comportamento mecânico do material em questão.

2.1 Bases Granulares Tratadas com Cimento

A mistura da BGTC é composta por um material britado com granulometria contínua e bem graduada, semelhante a uma Brita Graduada Simples (BGS). Nessa mistura, geralmente, adiciona-se de 3 a 5%, em peso, de cimento Portland e água (Bernucci et al,

2022). Além de facilitar a compactação, a água adicionada tem a função de hidratar o cimento, que se mistura à fração granular fina. Desse modo, forma-se uma pasta que se liga pontualmente aos agregados graúdos, estabelecendo ligações pontuais entre eles, em vez de envolvê-los, como ocorre no concreto (Andrade et al, 2015). Os pavimentos asfálticos que utilizam esse material em suas camadas de base ou sub-base, são designados como pavimentos semirrígidos.

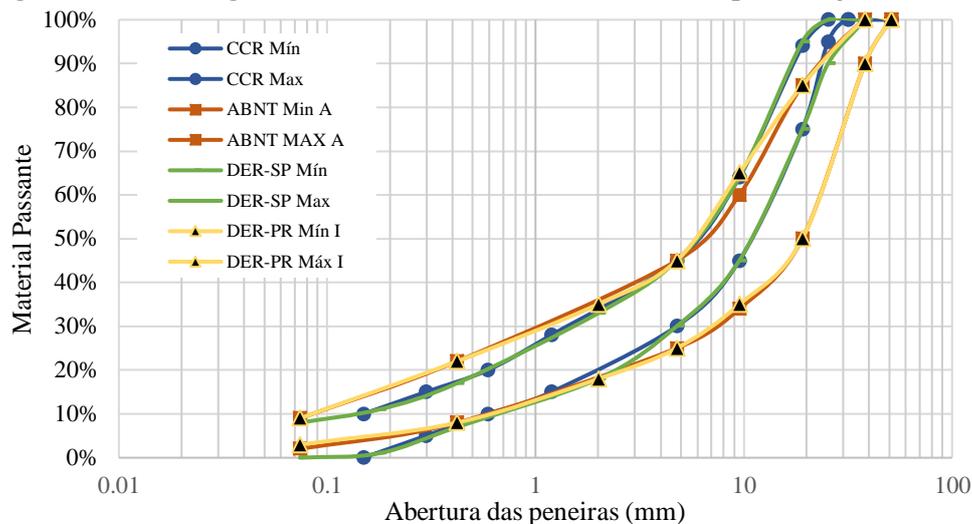
A partir do final da década de 1970, a BGTC teve um aumento significativo de sua adoção no Brasil. Desde então, tem sido amplamente utilizada, especialmente em pavimentos de vias com alto volume de tráfego (Bernucci et al, 2022). No entanto, devido ao seu alto custo de implantação em comparação com técnicas similares, bem como à falta de informações adequadas e a erros de execução, essa técnica acaba sendo excluída dos projetos rodoviários revestimento (Paixão et al, 2017). Um dos principais desafios das bases cimentícias reside na influência direta da presença do cimento. Se a quantidade de cimento for insuficiente, o pavimento torna-se frágil e mais suscetível à fadiga. Por outro lado, se a quantidade for excessiva, o comportamento do pavimento se assemelha ao concreto, aumentando o risco do surgimento de trincas por retração. Ambos os cenários resultam em fissuras que se propagam para as camadas superiores, eventualmente alcançando o revestimento (Paixão et al, 2017).

Dos vários projetos mencionados por Motta & Ubaldo (2015), a aplicação da BGTC como camada de sub-base é adotada. Conhecida como pavimento invertido, essa configuração permite que a camada de base seja composta por uma BGS, e desempenhando o papel de evitar a reflexão de trincas da sub-base cimentada para o revestimento asfáltico. Essa estratégia tem como objetivo solucionar problemas relacionados a trincas, melhorando a durabilidade e o desempenho dos pavimentos.

2.2 Granulometria das Misturas de Brita Graduada Tratada com Cimento

A granulometria correta dos agregados desempenha um papel fundamental no desempenho e durabilidade das misturas de BGTC. A escolha adequada da distribuição de tamanho dos agregados tem um impacto direto nas propriedades mecânicas, comportamento estrutural e resistência da mistura. A Figura 1 apresenta comparativamente as faixas granulométricas de especificações utilizadas nacionalmente, sendo essas: ABNT NBR 11803 (2013), DER-SP (2005), DER-PR (2005) e CCR (2002)

Figura 1 – Curvas granulométricas de BGTC conforme especificações técnicas



Fonte: autora

2.3 Parâmetros de Compactação

A relação entre a massa específica aparente seca máxima da mistura ($\rho_{\text{máx}}$) e a umidade ótima ($\omega_{\text{ót}}$) está ligada à compacidade e 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 energia de compactação pode ser normal, intermediária ou modificada. Embora as normas e especificações brasileiras para materiais cimentados indiquem a compactação com a energia intermediária, uma observação frequente após revisar as fontes bibliográficas deste estudo Klinsky e Farias (2015), Nunes e Albuquerque (2021) e Prado (2018) é que a energia de modificada é a mais utilizada. Isso ocorre porque, ao compactar na energia intermediária, há uma diminuição no desempenho mecânico da BGTC, em relação às amostras compactadas na energia modificada.

A seguir é apresentado uma breve relação entre os dois parâmetros discutidos nesse tópico, a fim de identificar o efeito do teor de cimento nos mesmos:

- Por meio do ensaio de compactação na energia modificada, Nunes e Albuquerque (2021) constataram que as misturas de BGTC com teores de cimento de 3 e 5% apresentaram uma diferença de 0,1 g/cm³ na massa específica seca máxima e 0,6% no teor de umidade ótima.
- Prado (2018) realizou estudos envolvendo misturas de BGTC com teores de cimento de 3, 4 e 5%. Essas misturas foram submetidas 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.
- Klinsky e Faria (2015) também conduziram pesquisas com misturas de BGTC usando teores de cimento de 2, 3 e 4%, submetendo-as aos ensaios de compactação nas energias intermediária e modificada. Nas condições de energia intermediária, observaram uma variação máxima de 0,04 g/cm³ na massa específica seca máxima e

0,5% na umidade ótima. Já na energia modificada, essas variações foram reduzidas para 0,03 g/cm³ e 0,1%, respectivamente, para as mesmas propriedades.

2.4 Propriedades mecânicas relevantes

Os revestimentos de pavimentos flexíveis enfrentam esforços de compressão e tração devido à flexão, enquanto as camadas inferiores, geralmente granulares ou de solo, suportam principalmente cargas de compressão. Em certos casos, como na BGTC, camadas adjacentes aos revestimentos podem ser quimicamente estabilizadas para adquirir coesão e rigidez, tornando-se capazes de resistir a esforços de tração (Bernucci et al, 2022).

Portanto, os parâmetros de resistência à tração e rigidez desempenham papéis cruciais na distribuição uniforme de cargas veiculares, prevenção de trincas, manutenção da integridade estrutural, resistência à fadiga sob cargas repetidas e redução da necessidade de manutenção. Para avaliar essas propriedades, existem ensaios específicos, como o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RCD) e o ensaio de resistência à tração na flexão (RTF). A principal diferença entre eles está na direção da aplicação da força: o RCD aplica a força perpendicular ao eixo do material, enquanto o RTF aplica a força perpendicular à superfície, criando flexão.

Para analisar as propriedades de rigidez, são realizados ensaios de módulo de resiliência na compressão triaxial (MRT) e módulo de resiliência à tração por compressão diametral (MRD). A diferença fundamental entre esses parâmetros está na direção das forças aplicadas: o MR avalia a resposta elástica sob pressão em todas as direções, enquanto o MRD avalia a resposta elástica sob forças de tração em direções opostas. Ao conduzir o teste de resistência à tração, é igualmente viável calcular o módulo de elasticidade.

Em 2016, Klinsky & Faria mostraram em seus estudos, do qual variaram porcentagem de cimento (2, 3 e 4%), origem do agregado (granítica e basáltica) e energia de compactação (intermediária e modificada) que os valores de módulo de resiliência por compressão diametral são sensivelmente influenciados pelo teor de cimento. À medida que o teor de cimento é elevado, a mistura adquire maior rigidez, o que se reflete em valores crescentes para o módulo. Adicionalmente, é digno de nota que os valores dos módulos demonstraram uma notável elevação para amostras compactadas na energia modificada utilizando agregados de rocha basáltica. Em relação à RCD, os resultados também revelaram uma clara dependência em relação ao teor de cimento e à energia de compactação. À medida que o teor de cimento aumentou, observou-se um aumento de aproximadamente 100% na resistência.

Em seu estudo, Prado (2018) avaliou diferentes variáveis em misturas de BGTC, incluindo diversos teores de cimento (3, 4 e 5%), curvas granulométricas (A, especificações baseadas no DER-SP, e B, baseada em especificação da República da África do Sul) e dois níveis de umidade, na ótima e 1% abaixo. Concluiu que o módulo de resiliência, em geral, se torna mais rígido para amostras moldadas com umidade 1% abaixo da ótima. O aumento do teor de cimento foi responsável pelo incremento na resistência à tração e na rigidez das misturas de BGTC estudadas pelo autor.

Yeo (2011) conduziu experimento em misturas de BGTC variando o teor de cimento de 1 a 5% com o propósito de examinar parâmetros mecânicos como a resistência à tração por compressão diametral. No caso das amostras submetidas à cura de 28 dias, houve um aumento de 0,22 MPa para cada aumento de 1% no teor de cimento. Para amostras curadas por apenas 7 dias, foi registrado um aumento de 0,08 MPa para cada incremento de 1% no teor de cimento.

Motta e Ubaldo (2014) realizaram ensaios de módulo de resiliência de BGTC com 4% de cimento e curadas por 28 dias de cura. O ensaio foi executado de acordo com os procedimentos descritos pela norma DNIT 134 (2010). Os resultados oscilaram de 1.300 MPa até 3.650 MPa, em função do teor de umidade das amostras.

Lima (2022) avaliou misturas de BGTC com diferentes teores de cimento (2, 4 e 6%) e duas curvas granulométricas (C1 e C2, conforme especificações europeias) e verificou que o MRT variou entre 3.281 MPa e 24.682 MPa e, entre 5.623 MPa à 27.970 MPa, aos 7 e 28 dias de cura, respectivamente. Destaca-se que, os resultados consistem na média do MRT para as cinco tensões aplicadas durante o ensaio, conforme método de ensaio 181 (DNIT, 2018b). Dentre os fatores estudados, o teor de cimento demonstrou ser o que mais impacta nos resultados.

Tessari (2017) estudou a adição de borracha moída de pneu (BMP) nos teores 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 3,5; e 4,5% em misturas de BGTC com teores de cimento de 3, 4 e 5%. Foram obtidos valores de MR de 200 MPa a 1.000 MPa pelas composições com e sem adição de BMP, de acordo com o método de ensaio 134 (DNIT, 2018a). Nesse mesmo estudo foram obtidos valores de RCD entre 0,7 MPa e 1,17 MPa aos 28 dias de cura.

Conforme especificações técnicas e recomendações de pesquisadores são esperados valores para o módulo de resiliência, o DER-SP (2006) descreve numa tabela intervalos de valores entre 7.000 MPa e 18.000 MPa para BGTC. O Everseries User Guide (2005) recomenda valores de módulo entre 1.400 MPa e 20.000 MPa para camadas cimentadas. Bernucci et al. (2022) esperam valores da ordem de 3.000 MPa a 12.000 MPa para BGTCs.

Klinsky e Faria (2016) obtiveram resultados de RCD entre 0,09 e 0,52 MPa aos 7 dias para misturas com agregado granítico e energia de compactação modificada, já aos 28 dias de cura para essas mesmas condições obtiveram 0,22 e 0,77 MPa. Quando avaliada a mesma característica de compactação, porém com o agregado basáltico, os valores foram levemente superiores, variando entre 0,27 e 0,53 MPa aos 7 dias e 0,43 MPa e 1,11 MPa aos 28 dias de cura. Já Prado (2018) obteve valores de RCD variando de 0,35 MPa à 0,76 MPa aos 7 dias, e de 0,44 MPa à 0,95 MPa aos 28 dias de cura para as misturas confeccionadas com a granulometria A.

Um ponto abordado por Tessari (2017) consiste no entendimento de a BGTC, ser governada primordialmente pela tensão confinante (comportamento apresentado por materiais granulares) ou pela tensão de desvio (comportamento apresentado por materiais coesivos). Com isso, o autor utilizou o modelo composto para avaliar o comportamento da BGTC com e sem adição de BMP. Foi observado que, em sua

critérios de aceitação dos materiais utilizados em camadas de sub-bases e bases de BGTC para obras rodoviárias no Brasil.

3.1.2 Cimento Portland

O cimento empregado nesta pesquisa foi o CP II-Z 40, que corresponde, de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), ao Cimento Portland Composto (CP II) com adição de pozolana (Z) devendo apresentar valores mínimos de resistência à compressão, aos 28 dias de cura, de 40 MPa (40). A justificativa para a seleção deste cimento está no fato de que o mesmo é utilizado na execução da obra de duplicação.

Segundo Zampieri (1993), os cimentos aditivados apresentam diversas vantagens técnicas significativas. Entre elas, destaca-se a maior durabilidade em ambientes agressivos, uma vez que são menos suscetíveis a reações expansivas do tipo alcalino-agregado. Além disso, esses cimentos liberam menos calor durante o processo de hidratação. Outros benefícios incluem maior impermeabilidade e resistência mecânica superior em idades mais avançadas (> 28 dias).

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, 2017a);
- Determinação do início e fim de pega – conforme a NBR 16607 (ABNT, 2017b).

Os resultados obtidos nos ensaios (Tabela 1) foram considerados adequados para o tipo de cimento utilizado, atendendo às especificações do material estabelecidas no documento (DNER, 1995).

Tabela 1 – Caracterização física do cimento utilizado na pesquisa

Ensaio	Resultado	Referência Normativa
Finura (%)	0,99	$\leq 10 \%$
Tempo Início de Pega (h)	2:38	≥ 1
Tempo Fim de Pega (h)	2:78	≤ 10
Massa Específica (g/cm³)	3,03	-

Fonte: autora

3.1.3 Mistura de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)

A determinação do teor de umidade utilizado nas misturas, visando a moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos da BGTC, foi realizada por meio do ensaio de compactação utilizando a energia modificada. Através deste ensaio, foi possível 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%, que é o valor empregado na obra em

questão. Os resultados obtidos foram de 6,25% para a umidade ótima e 2,33 g/cm³ para a massa específica aparente seca máxima da mistura.

Conforme destacado na revisão bibliográfica, observa-se uma variação mínima desses parâmetros à medida que os percentuais de aglomerante são modificados. Portanto, a decisão tomada foi de manter constantes esses dois valores para todas as misturas, independentemente do teor de cimento utilizado.

3.2 Métodos

Primeiramente, definiu-se a faixa de variação dos percentuais de cimento, considerando os valores frequentemente utilizados em literatura e normas que caracterizam a BGTC. Com base nessa abordagem, foram planejadas seis misturas distintas, abrangendo uma variação do teor de cimento de 1% a 6% em relação à massa de agregado seco. Os teores de 1 e 2% não são comumente utilizados, entretanto, foram empregados com o propósito de investigar os efeitos dessas proporções, visando compreender o comportamento das misturas contendo baixos teores de cimento.

Os corpos de prova (CPs) utilizados nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência por compressão diametral foram confeccionados utilizando o método de compactação por impacto, empregando o aparelho Marshall, na umidade desejada. Esse processo de moldagem foi realizado em uma única camada, submetendo os corpos de prova a golpes em ambos os lados da amostra, a fim de alcançar dimensões aproximadas de 10,2 cm de diâmetro e 6,3 cm de altura, conforme ilustrado na Figura 3. O número de golpes foi ajustado para alcançar a altura desejada, a fim de obter grau de compactação (GC) próximo a 100%. Por outro lado, os corpos de prova moldados para o ensaio de módulo de resiliência na compressão triaxial foram confeccionados mediante o emprego do método de compactação vibratória, conforme Figura 3. Para essas amostras, a moldagem é realizada em 10 camadas obtendo corpos de prova com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

Os corpos de prova foram desmoldados imediatamente após a moldagem e armazenados em sacos plásticos, devidamente identificados, mantidos em câmara úmida com temperatura ambiente e umidade relativa do ar controlada em 89%, respectivamente, sem imersão em água, durante 7 e 28 dias.

Figura 3 – Equipamentos utilizados na moldagem dos CPs: Soquete Marshall, Soquete vibratório e Molde



Fonte: autora

3.2.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD)

Quando submetidas ao tráfego, camadas de pavimento compostas por materiais cimentados, como a BGTC, desenvolvem tração por flexão na fibra inferior da camada. Essa tração é contraposta e resistida por meio da sua cimentação ou coesão.

Devido à inexistência de uma norma específica para materiais cimentados, o ensaio foi conduzido seguindo os métodos estabelecidos no método de ensaio 136 (DNIT 2010), originalmente desenvolvido para misturas asfálticas. Antes de realizar o ensaio, procedeu-se à aferição do diâmetro e da altura de cada corpo de prova utilizando um paquímetro com precisão de centésimos de milímetro.

Para a realização do ensaio, o corpo de prova foi posicionado na prensa, com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos curvos, e na face inferior, a carga foi aplicada de forma progressiva, com uma velocidade de deformação de 0,8 mm/s até a ruptura desse corpo de prova. Em seguida, registrou-se o valor da carga resultante e, com base nesse resultado, juntamente com as medidas do diâmetro e altura do corpo de prova, foi determinada a resistência à tração de cada amostra. A figura 4 mostra o procedimento do ensaio.

Figura 4 – Prensa de execução do ensaio de RCD



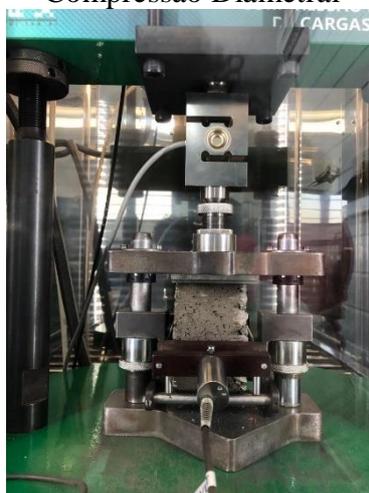
Fonte: autora

3.2.2 Módulo de Resiliência por Compressão Diametral (MRD)

O ensaio de compressão cíclica diametral foi adotado para a determinação do módulo de resiliência das misturas de BGTC, seguindo as diretrizes estabelecidas no método de ensaio 135 (DNIT, 2010c).

O equipamento utilizado consiste em uma estrutura metálica com um pistão que aplica carregamento repetido pulsante, auxiliado por um dispositivo pneumático acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1 Hz (frequência sugerida pela norma). As amostras foram submetidas a deformações horizontais, medindo-as através de um transdutor de deslocamento variável linear (LVDT) conectado a um microcomputador. A norma estabelece que seja utilizada no ensaio um percentual entre 5% e 25% do valor obtido no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, nesse estudo, o carregamento foi de 25% da carga de ruptura e o coeficiente de Poisson (μ), nessa pesquisa foi utilizado 0,2. Na figura 5 é mostrado um CP sendo ensaiado conforme procedimento descrito.

Figura 5 – Equipamento utilizado para ensaio de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral



Fonte: autora

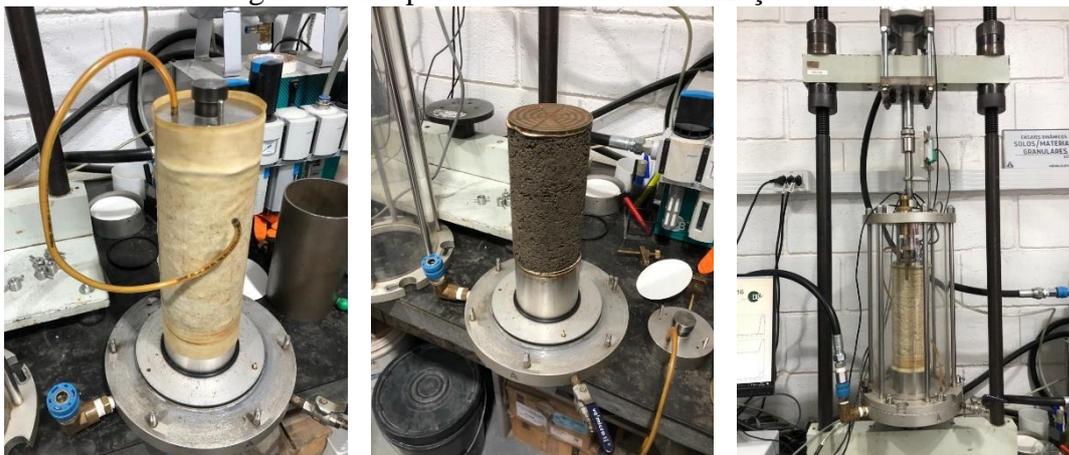
3.2.3 Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial (MRT)

O ensaio triaxial de carga cíclica foi conduzido para a determinação do módulo de resiliência, conforme estipulado pelo método de ensaio 134 (DNIT, 2018a) - Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência e, pelo método de ensaio 181 (DNIT, 2018b) – Pavimentação - Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência. Em ambos os procedimentos, é realizada uma aplicação cíclica de carga de compressão vertical na parte superior da amostra. Esses ciclos consistem em cargas sucessivas e alívio subsequente, os quais são ajustados de acordo com as frequências e intensidades prescritas. Notavelmente, a tensão confinante é mantida constante conforme estabelecido pelo método de ensaio 134 (DNIT, 2018a), enquanto que o método de ensaio 181 (DNIT, 2018b) não há aplicação de tensão confinante. A seguir é apresentado o procedimento de ensaios de acordo com cada uma das duas normas.

No método de ensaio conforme a norma DNIT 134 (2018a), o cálculo do módulo de resiliência é realizado mediante a aplicação de tensões confinantes (σ_3) e de desvio (σ_d), estabelecendo uma relação com a tensão de desvio axial (σ_d) e a correspondente deformação específica vertical recuperável (ϵ_r). O procedimento normativo descreve de forma detalhada o ensaio, começando com a aplicação repetitiva da tensão de desvio a uma frequência constante de 1 Hz, enquanto a tensão confinante permanece constante. A etapa de condicionamento exige 500 repetições para cada valor de tensão de desvio em pares, seguida pela fase de determinação do módulo de resiliência, que inclui a aplicação de 18 pares de tensões conforme especificado na norma, resultando em leituras das deformações específicas. Em cada conjunto de tensões, são necessários no mínimo 10 ciclos de carga, e dados de pelo menos 5 repetições de carga são coletados, assegurando a consistência com uma diferença máxima de 5% entre as leituras. Para o cálculo do módulo de resiliência, a média dessas 5 leituras é utilizada estritamente de acordo com as diretrizes estabelecidas.

Já para o método de ensaio estipulado na norma DNIT 181 (2018b), o cálculo do módulo de resiliência em relação a materiais tratados quimicamente consiste na correlação entre a tensão principal maior ou vertical (σ_1), aplicada de forma iterativa à amostra, e a deformação vertical recuperável ou resiliente correspondente (ϵ_r). O ensaio foi executado com uma frequência de 1 Hz, o equivalente a 60 ciclos por minuto, seguindo uma sequência de 5 diferentes níveis de tensão. Para cada magnitude de tensão, um total de 50 ciclos de carga foram aplicados repetidamente. Na Figura 6, é apresentada a preparação do CP antes do ensaio, bem como o CP já instalado no equipamento, pronto para ser submetido ao ensaio.

Figura 6 – Preparo das amostras e realização do ensaio



Fonte: autora

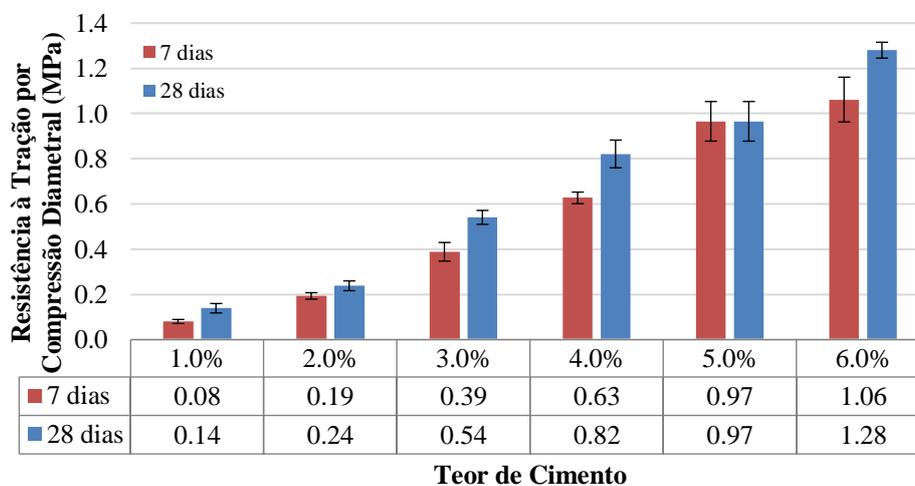
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios utilizados para avaliar as características mecânicas da BGTC. Para essa análise dos resultados, procedeu-se à elaboração de gráficos que exibem os valores resultantes dos ensaios. Antes da criação destes gráficos, uma metodologia de triagem dos resultados foi empregada, na qual se efetua o cálculo da média dos valores e se procede à exclusão de quaisquer dados que se encontrem fora do intervalo definido como média \pm 10% da média. Este procedimento foi adotado com a finalidade de mitigar a análise de dados que possam conter erros experimentais. Destaca-se que os resultados representam a média de no mínimo duas amostras.

4.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD)

Na Figura 9 são apresentados os resultados dos ensaios de RCD para 7 e 28 dias de cura de acordo com cada percentual de cimento. Além disso, os desvios padrão também podem ser observados.

Figura 7 – Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: autora

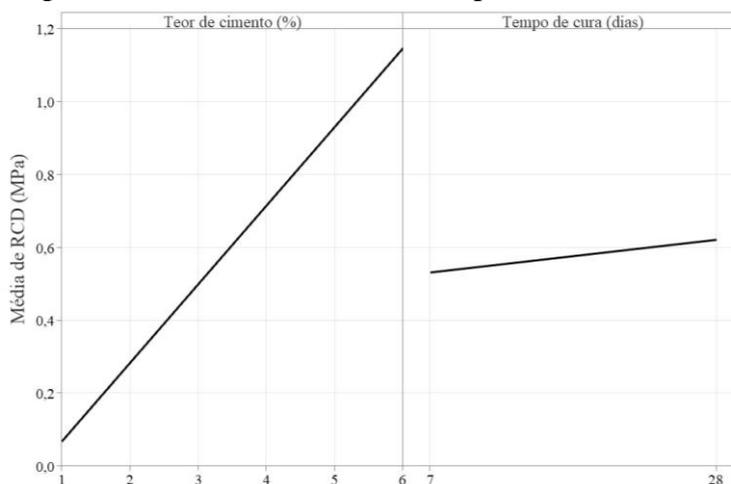
Dos valores obtidos e posteriormente analisados destacam-se algumas observações:

- Um aumento na RCD à medida que o teor de cimento aumenta. Este resultado está de acordo com as expectativas, conforme indicado pela revisão bibliográfica anteriormente conduzida.
- Aos 7 dias de cura alcançou-se, em média, mais de 70% do valor da RCD obtida aos 28 dias de cura
- As amostras com teores de 4 e 6% obtiveram maior incremento de resistência entre os 7 e 28 dias de cura.
- Os maiores desvios padrão apresentados foram para as amostras com teor de 4 e 5% de cimento.

Nas figuras 9 e 10 são apresentados gráficos de efeitos principais e de contorno para os resultados de RCD, respectivamente. O primeiro aborda os principais fatores que afetam os valores de resistência, demonstrando que o teor de cimento e o tempo de cura têm um impacto significativo. No entanto, é importante notar que o teor de cimento tem um efeito mais significativo do que o tempo de cura, uma vez que há maior variação nos resultados obtidos.

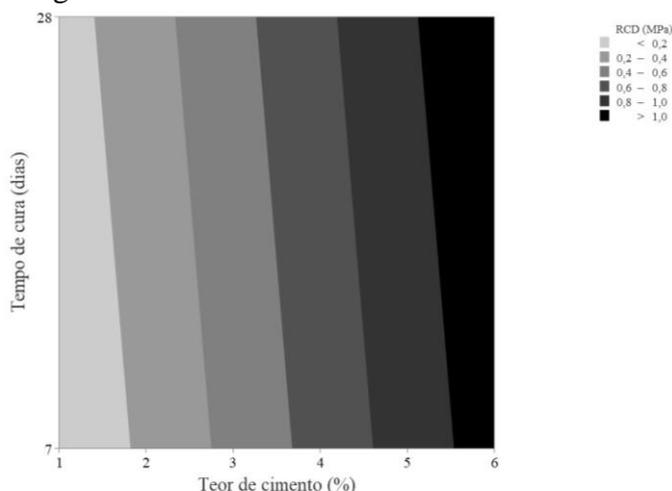
Já no gráfico de contorno permite fazer relações entre o teor de cimento e o tempo de curam, permitindo a obtenção aproximada de valores de resistência para parâmetros intermediários.

Figura 8 – Gráfico de Efeitos Principais: Ensaio de RCD



Fonte: autora

Figura 9 – Gráfico de Contorno: Ensaio de RCD

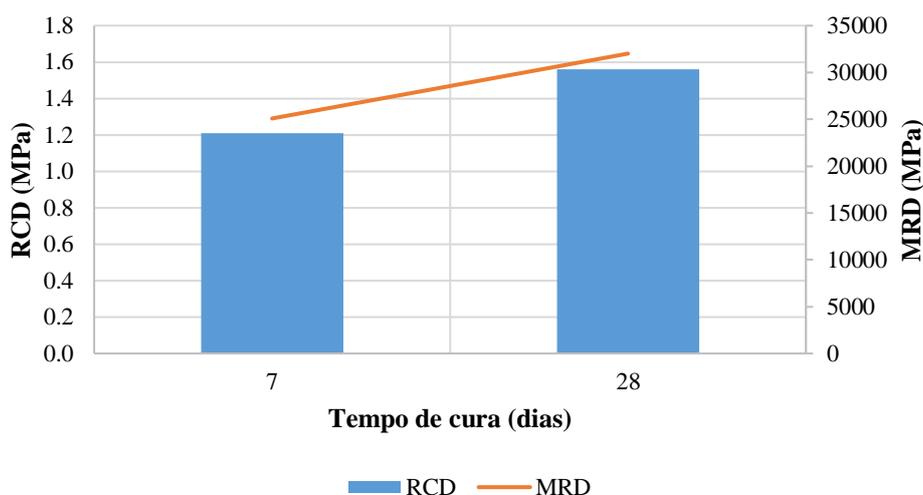


Fonte: autora

4.2 Módulo de Resiliência por Compressão Diametral (MRD)

Para a realização do ensaio de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral, foram conduzidos dois testes nas misturas contendo 3 e 4% de cimento. Conforme previsto, os resultados apresentaram inconsistências, com desvios superiores a 10.000 unidades entre os lados opostos, isso se justifica pela baixa resistência à tração que apresentaram as misturas com esses teores. Os resultados se mostraram coerentes somente para os corpos de prova provenientes das misturas contendo 6% de cimento. Isso se deve ao fato de que essa composição em particular foi a única a alcançar resultados superiores a 1 MPa na avaliação da resistência à tração. A Figura 10 apresenta os resultados de RCD e MRD para as amostras com 6% de cimento curadas por 7 e 28 dias.

Figura 10 – Relação entre RCD e MRD aos 7 e aos 28 dias



Fonte: autora

No que diz respeito a esta análise, é possível destacar os seguintes pontos:

- Os valores de RCD e MRD apresentaram aumento em relação ao tempo de cura.

- Apesar da avaliação ser baseada em um único teor de cimento, é evidente uma correlação entre os resultados de RCD e MRD, em que ambos aumentam cerca de 22% com o aumento do tempo de cura.

4.3 Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial (MRT)

Por último, são apresentados os resultados do ensaio de Módulo de Resistência por Compressão Triaxial. Para isso, foram gerados gráficos de regressão potencial tendo em vista dois modelos, de acordo com cada uma das normas aplicadas:

$$\text{DNIT 181 (2018)} \quad MRT = k_1 \times \sigma_d^{k_2}$$

$$\text{DNIT 134 (2018)} \quad MRT = k_1 \times \theta^{k_2}$$

Sendo:

MRT: Módulo de Resiliência por compressão Triaxial (MRT), em MPa;

σ_d : tensões desvio, em MPa;

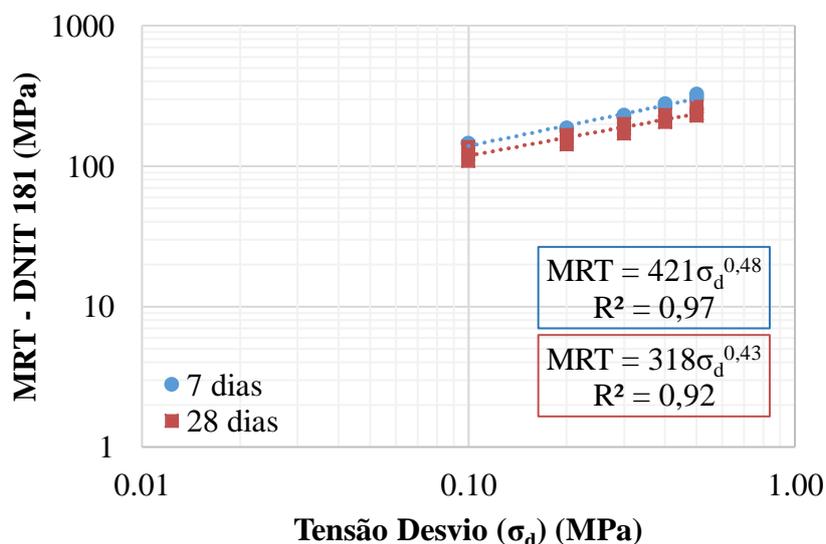
θ : associação aos pares de tensões aplicados tensão confinante (σ_3) e desvio (σ_d):

$$\theta = \sigma_d + (3 \times \sigma_3)$$

k_1 e k_2 : Coeficientes de regressão dos modelos para estimar MRT.

Na Figura 11 são apresentados os resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão triaxial aos 7 e aos 28 dias de acordo com método estipulado na norma DNIT 181 (DNIT, 2018b) para materiais estabilizados quimicamente.

Figura 11 – Resultado Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial (MRT) aos 7 dias e 28 dias DNIT 181 (2018)



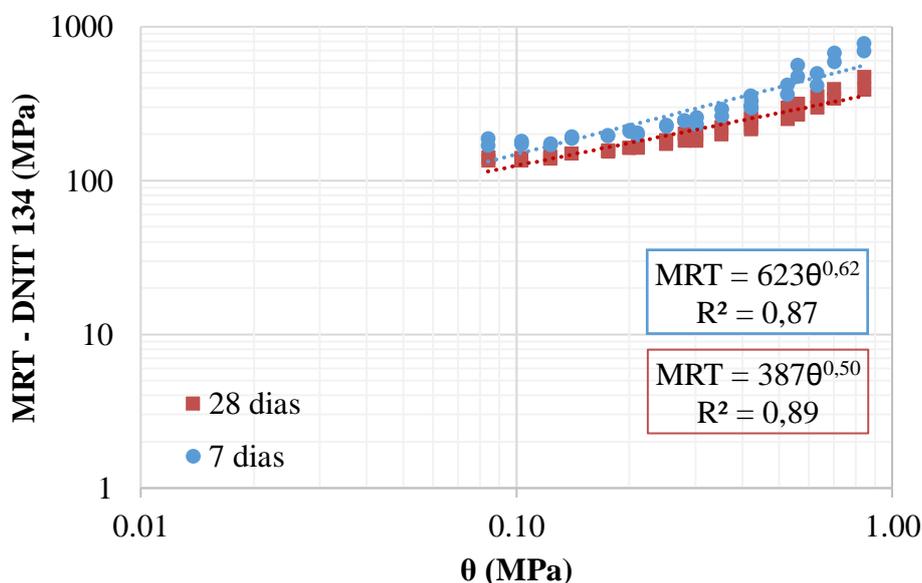
Fonte: autora

A partir desses resultados, é possível destacar que:

- Os valores registrados de MRT variam de 150 a 250 MPa aos 7 dias e de 120 a 270 MPa aos 28 dias de cura. Essa observação demonstra que não ocorreram variações significativas com relação ao tempo de cura.
- Os valores de MRT cresceram à medida que aumentaram os valores de tensão desvio.
- Com base nos valores de k_1 , nota-se um decréscimo no módulo de resiliência com o tempo de cura.

Na Figura 12 são apresentados os resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão triaxial aos 7 e aos 28 dias de acordo com o método descrito na norma DNIT 134 (DNIT, 2018a) para solos.

Figura 12 – Resultado Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial (MRT) em função de teta (θ) aos 7 dias e 28 dias DNIT 134 (2018)



Fonte: autora

A partir da análise, é possível observar os seguintes pontos:

- Os valores de MRT reduziram com o aumento do tempo de cura.
- Há um incremento no MRT à medida que aumenta o estado de tensões (θ), independentemente do tempo de cura.
- Os valores de k_2 , não se aproximando de 1, evidenciam a não linearidade no crescimento do MRT em relação às θ .

Ao analisar os dois gráficos, é evidente que o método de ensaio 134 (DNIT, 2018a) resultou em valores de módulo significativamente mais elevados. Isso sugere que a aplicação das tensões de confinamento torna a mistura mais coesa, resultando em módulos superiores.

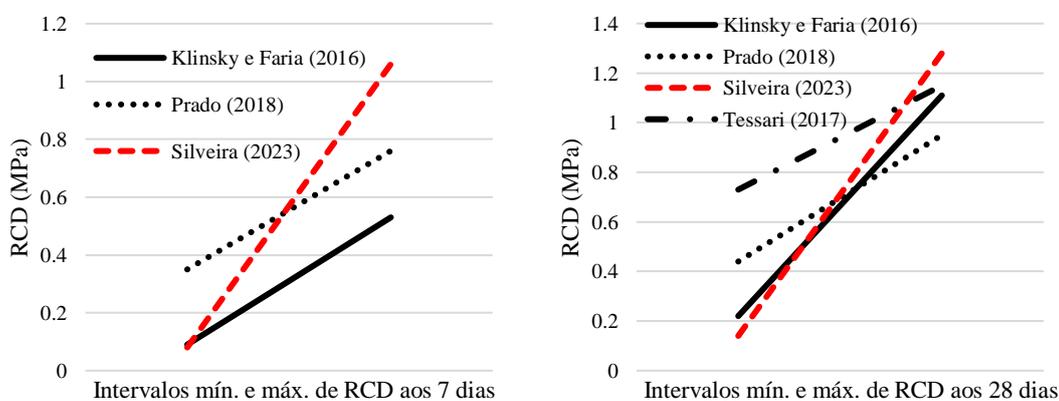
Além disso, é importante notar que, independentemente da norma utilizada, houve uma diminuição nos valores do módulo à medida que o tempo de cura aumentou. Esse

fenômeno não é incomum, uma vez que pode ser atribuído a retração ou microfissuras. É relevante mencionar que os mesmos corpos de prova foram usados tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias, já que o ensaio não é destrutivo. Uma alternativa a considerar seria a utilização de corpos de prova diferentes para cada período de cura, a fim de obter resultados mais precisos.

4.4 Comparação dos Resultados com Referências Bibliográficas

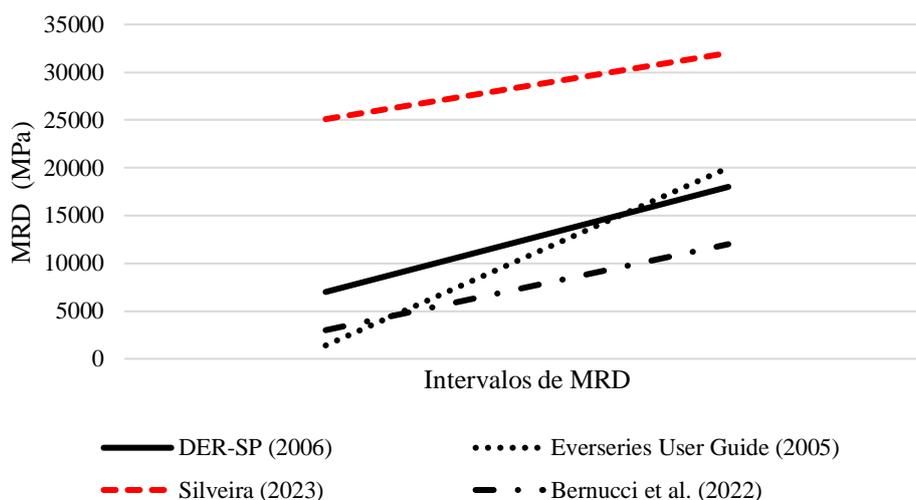
Neste tópico, apresentam-se gráficos que ilustram os valores de RCD e MRD, comparando-os com os dados obtidos neste estudo e os dados da literatura. É possível notar que, em relação aos valores de RCD, aos 7 dias de cura obteve-se valores mais altos dos demais autores, já aos 28 dias de cura os valores se mantiveram dentro de uma faixa semelhante. No entanto, os valores de MRD revelaram-se significativamente mais elevados em comparação com aqueles encontrados na literatura.

Figura 13 – Comparação dos valores de RCD aos 7 e aos 28 dias (MPa)



Fonte: autora

Figura 14 – Comparação dos valores de MRD aos 7 e aos 28 dias (MPa)



Fonte: autora

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo contribuir para as discussões relacionadas às Britas Tratadas com Cimento. Os valores variam de forma crescente de acordo com o teor de cimento e o tempo de cura das misturas.

Os valores de Módulo de Resiliência por Compressão Triaxial (MRT) aumentam conforme aumentam as tensões. Contudo, nota-se que os valores de MRT deste estudo se mostraram relativamente inferiores quando comparados com dados da literatura.

Quanto ao ensaio de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral (MRD) pode não ser o mais adequado para esse tipo de material, em virtude da pequena sensibilidade do equipamento para baixas resistências e dos valores de módulo bastante elevados encontrados para as amostras ensaiadas. Os valores encontrados de MRD excederam o que algumas normas e pesquisas indicam como parâmetros típicos.

Portanto, conclui-se que o teor de cimento e o tempo de cura influenciam nos valores de resistência e rigidez da BGTC estudada. Por fim, vale ressaltar que a escassez de estudos que aplicam a o método de ensaio 181 (DNIT, 2018b) é notável. Este fenômeno pode ser explicado, em parte, pelo fato de a norma ter sido publicada relativamente recentemente, no ano de 2018. Essa observação sublinha a importância de promover mais pesquisas e trabalhos que utilizem essa norma, a fim de enriquecer o entendimento sobre a BGTC e suas características.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, F. S.; NUNES, V. J. M. B. Influência do tipo de cimento nas características mecânicas da brita graduada tratada com cimento. **30º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, Universidade Federal de Sergipe, 2021.

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. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE, 29, 2015, Ouro Preto. **Anais...** 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 16605. Determinação da massa específica do cimento Portland.** Rio de Janeiro, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607. Determinação do início e fim de pega.** Rio de Janeiro, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12261. Dosagem de brita graduada tratada com cimento.** Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12261. Dosagem de brita graduada tratada com cimento - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2013b

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

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

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: Abeda, 2006, 504p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. 1. ed. (3. reimp.). Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2008 (reimp. 2010).

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2022.

DNER-EM. MT – **Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Cimento: recebimento e aceitação.** DNER-EM-036/95, 1995.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. ET-DE-P00/009/2005. **Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento BGTC.** São Paulo. 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. IP-DE-P00/001. **Projeto de Pavimentação.** São Paulo. 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. DER/PR-ESP-P16: **Pavimento - brita graduada tratada com cimento.** Paraná, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Glossário de termos técnicos rodoviários.** Rio de Janeiro: Publicação IPR 700, 1997, 296p.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNER-ME 134. **Pavimentação - Solos: Determinação do módulo de resiliência.** Rio de Janeiro, 2018a.

_____. DNER-ME 134. **Pavimentação - Solos: Determinação do módulo de resiliência.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNER-ME 162. **Solos - Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNIT-ME 181. **Pavimentação - Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018b.

_____. DNER-ME 136. **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNER-ME 135: **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018c.

ESPECIFICAÇÕES CCR. EN-000/00-0000.00-GER-A1-PV/ES-E-013-R7. **Especificação particular. brita graduada tratada com cimento**, 2002.

EVERSERIES USER'S GUIDE. **Pavement Analysis Computer Software and Case Studies**. Washington State Department of Transportation, Olympia, 2005. Disponível em:

<<https://apps.itd.idaho.gov/apps/manuals/Materials/Materials%20References/EverseriesUG1-2.pdf>>. Acessado em: 25 ago. 2023

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**. 2015, Relatório. Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) e Concessionária CCR Nova Dutra, Grupo CCR, Rio de Janeiro.

LIMA, R. M. **Análise do comportamento mecânico de britas graduadas tratadas com cimento (BGTC)**. 2022. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. PUBLICAÇÃO IPR – 179. **Ministério dos transportes**. Departamento nacional de infraestrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro. 2006.

MOTTA, L. M. G.; UBALDO, M. O. **Discussão Sobre Valores de Módulo de Resiliência de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 43, 2014, Macéio. Anais... Maceió, 2015.

PAIXÃO, Monique, et al. Pavimentos semirrígidos: prevenção e tratamento da reflexão de trincas. **XVI SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica**. UNIFACS, 2017.

PRADO, K. **Estudo de critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

SILVA, C. F. S. C. Reutilização do resíduo oriundo dos serviços de restauração asfáltica como material alternativo em camadas de pavimentos flexíveis. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2012.

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.

TESSARI, C. L. Análise do comportamento de brita graduada tratada com cimento com a adição de borracha de pneus para aplicação em camadas de base de pavimentos. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017.

YEO, Y. S. Characterization of cement-treated crushed rock base course for Western Australian Roads. 2011. 227f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curtin University, School of Civil and Mechanical Engineering, Australian, 2011.

ZAMPIERI, V. A. Cimento portland aditivado com pozolanas argilas calcinadas: fabricação, hidratação desempenho mecânico. 1993. 251 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.