

Comportamento à fadiga de misturas cimentadas do tipo BGTC com duas rochas representativas do Rio Grande do Sul

Fatigue behavior of CTCS type cemented mixtures using two representative rocks from Rio Grande do Sul, Brazil

Ana Helena Back¹, Lucas Dotto Bueno², Rinaldo José Barbosa Pinheiro³, Tatiana Cureau Cervo³

¹Faculdade Dom Alberto, Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil

²Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil

³Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

Contato: anahback@hotmail.com,  (AHB); lucas.bueno@ufsm.br,  (LDB); rinaldo@ufsm.br;  (RJBP); cervo.tatiana@ufsm.br;  (TCC)

Recebido:

7 de agosto de 2024

Revisado:

21 de novembro de 2024

Aceito para publicação:

15 de janeiro de 2025

Publicado:

24 de abril de 2025

Editor de Área:

Jorge Barbosa Soares, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Palavras-chave:

BGTC.

Trincamento por fadiga.

Análise mecanicista

Keywords:

Cement-treated crushed stones (CTSC).

Fatigue cracking.

Mechanistic analysis.

DOI: 10.58922/transportes.v33.e3035

RESUMO

A densificação do setor rodoviário torna necessária a habilitação de estruturas detentoras de maior capacidade estrutural. Para este fim, uma das técnicas desenvolvidas consiste na inserção de camadas de Britas Graduadas Tratadas com Cimento (BGTC) na composição dos pavimentos. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa foi estudar o comportamento à fadiga de quatro misturas do tipo BGTC, incorporando uma análise mecanicista aos resultados laboratoriais. Os materiais escolhidos para composição das misturas BGTC englobaram agregados de rochas ígneas extrusivas do estado do Rio Grande do Sul, aglutinados com teores de cimento de 3,5% e 5,5%. Para a análise mecanicista, utilizou-se o *software* MeDiNa, avaliando diferentes configurações de pavimentos semirrígidos e semirrígidos invertidos em substituição às camadas puramente granulares de um pavimento flexível tomado como referência. A partir dos resultados obtidos com base na análise mecanicista realizada, concluiu-se que misturas cimentadas com maior teor de cimento são efetivas tanto para uso em camada de base quanto em sub-base, desde que as camadas cimentadas não sejam delgadas. Para a condição de tráfego mais elevada (5×10^7) a utilização das misturas BGTC estudadas neste trabalho na camada de base, com 5,5% de cimento, permitiram reduzir 75% da espessura do material asfáltico empregado no revestimento.

ABSTRACT

The densification of the road sector makes it necessary to enable structures with greater structural capacity. To this end, one of the techniques developed consists of inserting layers of cement-treated crushed stones (BGTC) into the composition of the pavements. Therefore, the present research aims to study the fatigue behavior of four BGTC-type mixtures, incorporating a mechanistic analysis to the laboratory results. The materials chosen for the BGTC mixtures included aggregates of extrusive igneous rocks from the state of Rio Grande do Sul (Brazil), bonded with cement contents of 3.5% and 5.5%. For the mechanistic analysis, the MeDiNa software was used, evaluating different configurations of semi-rigid and inverted semi-rigid pavements replacing the purely granular layers of a flexible pavement taken as a reference. From the results obtained based on the mechanistic analysis carried out, it is concluded that cemented mixtures with a higher cement content are effective for both base and sub-base layers, as long as the cemented layers are not thin. For the highest traffic condition (5×10^7), the use of the BGTC mixtures studied in this paper in the base layer, with 5.5% cement, made it possible to reduce the thickness of the asphalt material used in the coating by 75%.



1. INTRODUÇÃO

O crescimento do volume e do peso do tráfego comercial desafiou a engenharia rodoviária a buscar soluções estruturais e construtivas para atender de forma duradoura as solicitações de carga e clima, sem trincamento ou afundamentos precoces nas camadas que compõem os pavimentos. Uma das técnicas desenvolvidas a fim de projetar pavimentos com maior capacidade estrutural é a inserção de materiais estabilizados por aglutinantes hidráulicos (tais como o cimento) em camadas de reforço do subleito, sub-base e base de estruturas de pavimentos, de maneira a reduzir as tensões atuantes nos revestimentos asfálticos, aumentando a rigidez do conjunto.

Em termos de espessura, o aumento de rigidez provocado pela estabilização da camada cimentada tende a permitir a redução no volume de material asfáltico empregado no revestimento, quando comparado à utilização de composições tradicionais de materiais granulares não aglutinados (Flintsch, Diefenderfer e Nunez, 2008). Sob o ponto de vista econômico, resultados de análises preliminares de custo de ciclo de vida em pavimentos, divulgados por Flintsch, Diefenderfer e Nunez (2008), sugerem que a utilização de estruturas compostas por camadas de base cimentada são alternativas economicamente viáveis para um tráfego interestadual. Os resultados dos autores corroboram com os estudos de Merrill, Dommelen e Gaspar (2006).

Balbo (2006), todavia, evidencia certas limitações estruturais e de rigidez quanto à utilização de misturas cimentadas, mais especificamente de Britas Graduadas Tratadas com Cimento (BGTC). De acordo com autor, uma das principais limitações deste material está no seu processo de ruptura quase frágil por fadiga, podendo levar a estrutura do pavimento ao dano acelerado. O trabalho de Albuquerque e Nascimento (2018), que avaliou o desempenho à fadiga de base cimentada do tipo BGTC na BR-101/SE, também identificou processo de degradação acelerado na camada cimentada, concluindo insucesso na aplicação do material no trecho experimental avaliado.

As características de resistência mecânica da BGTC são resultantes da contribuição de duas fases: esqueleto granular e matriz cimentada. Xuan et al. (2012) disserta que o esqueleto granular é influenciado principalmente pelo tipo de agregado, granulometria e grau de compactação, enquanto a matriz cimentada está diretamente relacionada ao teor de cimento, porcentagem de finos e condições de cura. De forma sucinta, a BGTC apresenta características de um concreto de consistência seca, sujeita à processos de retração pela reação de hidratação do cimento (Balbo, 2007). Theyse, De beer e Rust (1996) descrevem a BGTC como um material de alta rigidez, cujo processo de dano é governado pelo trincamento à fadiga.

Com relação à determinação laboratorial da vida de fadiga de misturas cimentadas, estudos laboratoriais desenvolvidos de forma pioneira pela escola francesa, expostos em Dac Chi (1978), Boissoudy e Kobisch (1979), Dac Chi (1981), Dac Chi e Mulders (1984) trouxeram importantes avanços em relação ao conhecimento destes materiais. Todavia, interpreta-se que o documento produzido por Midgley e Yeo (2008), em estudo desenvolvido aos cuidados de Austroads (2008), consolidou metodologias de ensaio e parâmetros empregados, que passaram a ser reproduzidos pela comunidade acadêmica internacional (Mandal, 2012; AASHTO, 2014).

De maneira complementar aos resultados laboratoriais, a definição dos modelos de vida de fadiga e sua utilização, em conjunto com demais análises mecanicistas, são etapas indispensáveis para o dimensionamento racional do pavimento. Nestes modelos, percebe-se que alguns autores definem como critério de ruptura por fadiga em camadas cimentadas a deformação de tração (Trichês, 1993; SAPEM, 2014; Austroads, 2014). Outros autores optam pela utilização da tensão de tração (LCPC, 1994; Midgley e Yeo, 2008), ou até mesmo a relação entre as tensões atuantes e sua resistência à tração (Ceratti, 1991; Trichês, 1993; Balbo, 1993; DMRB, 2006; AASHTO, 2014).

No Brasil, são escassos os trechos de pavimentos rodoviários que utilizam, em sua concepção, materiais cimentados como componentes empregados em camadas estruturais. Inserido neste contexto, o presente trabalho buscou avaliar o desempenho frente ao trincamento por fadiga de misturas cimentadas que possuam em sua composição agregados minerais representativos do estado do Rio Grande do Sul (RS), atrelando os resultados laboratoriais a uma análise mecanicista realizada com o programa MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), fornecendo assim alternativas para concepção de projetos em que o sistema estrutural típico (com emprego de materiais granulares nas camadas de base e sub-base) não consiga fornecer a performance adequada para o pavimento ao longo de sua vida útil.

Deve-se ressaltar ainda que, na literatura nacional, existem poucos relatos de avaliação mecanicista de materiais estabilizados quimicamente com o protocolo completo de caracterização dos materiais (rigidez e dano por fadiga). Usualmente, os materiais cimentados são analisados em plataformas mecanicistas sem informações referentes à curva de fadiga do material. Não é a intenção do presente trabalho desmerecer as análises mecanicistas realizadas pela prática de projetos rodoviários, mas sim avaliar as misturas cimentadas produzidas frente aos parâmetros de danificação, mediante incorporação da curva de fadiga do material na rotina de cálculo de análise.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista o objetivo proposto na pesquisa, que busca avaliar o desempenho frente ao trincamento por fadiga de misturas cimentadas, atrelando os resultados laboratoriais a uma análise mecanicista realizada com o programa MeDiNa, com o intuito de fornecer alternativas para concepção de projetos rodoviários, a metodologia do trabalho foi conduzida a fim de estudar os parâmetros de resistência, rigidez e comportamento a fadiga de misturas cimentadas mediante fabricação de amostras que possuem em sua composição dois tipos distintos de agregados pétreos.

Os agregados pétreos adotados para presente pesquisa são oriundos da província geomorfológica Planalto Meridional, cuja formação provém de basaltos e basaltos andesíticos de afinidade toleítica, distribuídos em uma pilha de derrames com até 2 km de espessura que perfaz mais do que 90% do vulcanismo (Holz e Ros, 2000).

Segundo as informações contidas no Cadastro Nacional de Produtores de Brita, com ano base de 2015, disponibilizado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), das 142 usinas de britagem em funcionamento no estado do RS, aproximadamente 130 desses afloramentos são lavras de rochas de origem vulcânica. Ou seja, mais de 90% das pedreiras do RS são classificadas como rochas ígneas extrusivas (DNPM, 2015).

Uma vez que ambos os agregados minerais utilizados nesta pesquisa detêm a mesma origem de formação, optou-se pela adoção de uma rocha de carácter básico e uma rocha de carácter ácido; acidez essa, oriunda das propriedades mineralógicas da rocha. Neste trabalho, o agregado referente a Pedreira P1 (Basalto), localizada no município de Cruz Alta/RS, será abordado com o código "SJ", enquanto o agregado referente a pedreira P2 (Riodacito), localizada no município de Itaara/RS, será abordado com o código "DP". Estas siglas foram as mesmas adotadas no trabalho de Back (2022), material base que originou os resultados expostos no presente artigo.

Os ensaios de caracterização física, química e mecânica, bem como a completa classificação rochosa dos agregados utilizados na pesquisa foram previamente estudados por Paiva (2017), Back (2018) e Back (2022). O estudo petrográfico, análise da área de lavra e caracterização laboratorial completa das propriedades químicas e geomecânicas de cada rocha estão expostos

em Back (2022). A Tabela 1 exibe, de forma comparativa, os resultados dos principais ensaios de caracterização laboratorial dos agregados utilizados nesta pesquisa.

Destaca-se que, muito embora os materiais rochosos possuam a mesma origem de formação, ambos exibem propriedades mineralógicas, químicas e físicas distintas, salientando a disparidade nos índices físicos das rochas, em especial os parâmetros de absorção e massa específica.

Em relação ao cimento Portland adotado na pesquisa, optou-se pela utilização do cimento Portland Pozolânico CP IV 32-RS Cauê da InterCement. O cimento Portland pozolânico possui baixo calor de hidratação, o que o torna recomendável na concretagem de grandes volumes sob temperaturas elevadas, sendo uma de suas principais vantagens a redução do calor de hidratação e o aumento da resistência em idades avançadas. A Tabela 2 apresenta as principais características físicas do cimento, obtidas laboratorialmente.

Tabela 1: Resultados dos principais ensaios de caracterização dos agregados.

Ensaio	SJ ⁽¹⁾	DP ⁽²⁾
Classificação Rocha	Basalto	Riodacito
Acidez da Rocha	Básica	Ácida
Abrasão "LA" (%)	12,56	10,05
Perda ao Choque Treton (%)	8,44	4,66
Esmagamento (%)	13,73	13,17
Índice Forma (Crivos) – Brita 1	0,88	0,91
Índice Forma (Crivos) – Brita 0	0,59	0,67
Absorção 3/4 (%)	1,19	2,19
Absorção 3/8 (%)	1,78	2,35
M.E.R. – Brita 1 (g/cm ³)	2,97	2,64
M.E.R. – Brita 0 (g/cm ³)	3,01	2,65
M.E.A. – Brita 1 (g/cm ³)	2,87	2,50
M.E.A. – Brita 0 (g/cm ³)	2,86	2,49
Sanidade Graúdo (%)	5,62	0,66

(1) SJ – Basalto;

(2) DP – Riodacito.

Tabela 2: Características físicas do Cimento CP IV – 32 utilizado na pesquisa.

Ensaio	Norma	Resultado	Limites	
			DNER-EM 36/95	NBR 16697/2018
Índice de Finura(%)	NBR 11579/13	3,04	≤ 8%	≤ 8,0
Início de Pega (min)	NBR 16607/18	285	≥ 60	≥ 60
Fim de Pega (min)	NBR 16607/18	375	≤ 720	≤ 720
Massa Esp. (g/cm ³)	NBR 16605/17	1,71	-	-
Perda ao Fogo (%)	NBR NM 18/12	2,94	≤ 4,5	≤ 6,5

2.1. Programa experimental

Os critérios metodológicos adotados para o processo de confecção e adoção de parâmetros das misturas cimentadas são oriundos das normas ABNT NBR 11803/2013 (ABNT, 2013a) e ABNT

NBR 12261/2013 (ABNT, 2013b). Ambas as normativas são referentes às misturas cimentadas do tipo BGTC, para emprego em camadas de base e/ou sub-bases de pavimentos.

No que tange a faixa granulométrica adotada, seguiu-se os preceitos de Balbo (1993) e Andrade et al. (2015). O primeiro autor disserta que, para misturas do tipo BGTC, o acerto granulométrico deve-se aproximar da graduação “B” de ABNT (2013a) visando a obtenção de elevadas resistências mecânicas, com maior economia no emprego de materiais.

Também foi utilizado como material de apoio a normativa estadual DAER-ES-P11/1991 (DAER, 1991), visando o desenvolvimento de misturas cimentadas passíveis de serem reproduzidas e confeccionadas em obras rodoviárias do estado do RS, respeitando as próprias vigências do estado, compostas por materiais representativos à região.

A escolha dos teores de cimento teve como base as especificações brasileiras de teores de cimento e resistências mínimas exigidas para aplicação em base ou sub-base de Brita Graduada Tratada com Cimento. O documento da ABNT (2013a) sugere teores de 3,0% até 5,0%. Já DAER (1991) sugere teores de 3,5% até 5,0%. Arteris (2015) recomenda teores acima de 5,0%. Tendo como base os documentos supracitados, optou-se por utilizar um teor de cimento na faixa mínima de trabalho (3,5%) e outro teor de cimento na faixa máxima de trabalho (5,5%), objetivando o estudo de misturas do tipo BGTC para possível emprego tanto em camadas de base quanto em camadas de sub-base.

Com relação às idades de cura, foram adotadas idades de 28 dias e 91 dias, em justificativa à utilização do cimento CP IV, uma vez que materiais pozolânicos apresentam menores velocidades de hidratação em relação ao clínquer. Dessa forma, exibem menor desenvolvimento inicial de resistência.

O ensaio de compactação das misturas BGTC foi realizado seguindo os preceitos de DNIT-ME 164/2013 (DNIT, 2013) e ABNT NBR 7182/2020 (ABNT, 2020), compactados na condição de energia *Proctor modificada*. Os resultados das curvas de compactação estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados das curvas de compactação das misturas cimentadas.

Mistura	Umidade	Massa Específica
	Ótima (%)	Aparente Seca Máx. (γ_{d-} g/cm ³)
SJ ⁽¹⁾ (3,5% de Cimento)	6,9	2,545
SJ ⁽¹⁾ (5,5% de Cimento)	7,1	2,535
DP ⁽²⁾ (3,5% de Cimento)	8,5	2,227
DP ⁽²⁾ (5,5% de Cimento)	7,8	2,235

(1) SJ – Basalto;

(2) DP – Riodacito.

Em análise dos resultados de compactação, identifica-se que cada agregado apresenta um comportamento distinto, de forma que, para a mistura SJ, o incremento no teor de cimento em 2% resultou em uma ligeira redução na massa específica aparente seca máxima e um aumento no teor de umidade (0,2%). Esse comportamento também foi identificado em demais literaturas, como por exemplo Yeo, Jitsangiam e Nikraz (2011), Aranha (2013), Arteris (2015), Prado, Albuquerque e Almeida (2020). Em contrapartida, o comportamento exibido pela mistura DP tende a ser atípico, de forma que o aumento no teor de cimento promoveu ligeiro acréscimo na massa específica aparente seca máxima da mistura em adição à uma considerável redução da umidade ótima. Tal comportamento atípico também foi identificado nas curvas de compactação de Britas Graduadas Simples realizadas por Sagrilo (2020), empregando o mesmo material rochoso utilizado na presente pesquisa (DP).

Identifica-se que a maior massa específica por parte da rocha SJ – Basalto ($2,87 \text{ g/cm}^3$) refletiu na massa específica aparente seca máxima das misturas cimentadas SJ (3,5) e SJ (5,5), quando comparado à rocha DP – Riodacito ($2,50 \text{ g/cm}^3$). Com relação ao teor de umidade, as misturas cimentadas também exibiram o comportamento em função de seu material rochoso, de forma que as misturas SJ (3,5) e SJ (5,5) obtiveram teores de umidade inferiores à DP (3,5) e DP (5,5), uma vez que basalto avaliado possui absorção na ordem de 1,2%, enquanto o riodacito avaliado possui absorção na ordem de 2,3%.

Após a definição dos parâmetros de caracterização das misturas, procedeu-se com a moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos, para posterior determinação dos parâmetros de resistência, rigidez e comportamento a fadiga do material. Como critério de aceitação dos corpos de prova, foi adotado o exposto na norma ABNT (2013b), que atribui como limite para o grau de compactação $\pm 2\%$ (grau de compactação entre 98% e 102%) e teor de umidade podendo variar até $\pm 0,5\%$.

2.1.1. Ensaios de resistência, rigidez e fadiga

Para obtenção dos parâmetros de resistência das misturas estudadas neste trabalho, iniciou-se o protocolo de investigação pelo ensaio de Resistência a Compressão Simples (RCS), conforme diretrizes apresentadas na norma ABNT NBR 5739/2018 (ABNT, 2018). Para este e para os demais testes de resistência, assim como para o teste de rigidez (módulo de resiliência), foram ensaiados 8 corpos de prova para cada mistura cimentada, bem como para as duas idades de cura.

Para determinação da resistência à tração na flexão (RTF), procedeu-se conforme diretrizes da norma ABNT NBR 12142/2010 (ABNT, 2010); já para o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), seguiu-se os preceitos estabelecidos por DNIT-ME 136/2018 (DNIT, 2018b).

Em relação às condições de rigidez dos materiais cimentados produzidos neste trabalho, utilizou-se o teste de Módulo de Resiliência (MR), cuja determinação seguiu as descrições da norma DNIT-ME 135/2018 (DNIT, 2018a). Tratando-se das informações de rigidez, ressalta-se que a metodologia mais adequada para obtenção dos resultados de módulo resiliente de camadas cimentadas segue os preceitos de DNIT-ME 181/2018 (DNIT, 2018c). Este documento avalia a rigidez do material por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas, porém com tensão de confinamento nula, sendo apenas a tensão axial (ou vertical) aplicada de forma repetida com o controle do pulso, duração e frequência de aplicação da carga. Neste trabalho, tendo em vista a inexistência do módulo de operação descrito em DNIT (2018c) na prensa triaxial utilizada, optou-se por avaliar a rigidez das misturas estabilizadas conforme normativa DNIT (2018a), com uso do equipamento de aplicação de cargas por compressão diametral.

No que tange a avaliação do comportamento à fadiga das misturas cimentadas, seguiu-se os preceitos da normativa DNIT-ME 434/2021 (DNIT, 2021a), com algumas adaptações metodológicas propostas por Midgley e Yeo (2008). A vida de fadiga deve ser expressa em relação às tensões aplicadas comparadas à resistência à tração estática (vide Equação 1).

$$N_{FAD} = 10^{(K_1 + K_2 \times \%RF)} \quad (1)$$

Em que:

N_{FAD} = Número de repetições de carga para ruptura da amostra;

K_1 e K_2 = Parâmetros experimentais;

$\%RF =$ Razão entre tensão de tração aplicada (t) e a resistência à tração à ruptura estática do material (r), ambas em MPa.

Na tentativa de reduzir o período de ensaio, neste estudo, foram adotados 3 níveis de tensão de aplicação de carga, sendo utilizadas três amostras para cada tensão de aplicação, totalizando o somatório de no mínimo 9 amostras para cada uma das quatro misturas cimentadas. Os níveis de tensões utilizados nos ensaios para as amostras com 3,5% de teor de cimento oscilaram de 44% até 54%; enquanto que para as misturas com 5,5% de teor de cimento, os níveis oscilaram de 64% até 76%. Ainda, com base nas conclusões obtidas por Midgley e Yeo (2008), adotou-se como critério de parada a redução de 60% do MR inicial do teste.

Para os ensaios de fadiga, optou-se pela adoção de apenas uma idade de cura (28 dias), trazendo assim uma abordagem mais conservadora em relação ao desempenho à fadiga das misturas BGTC, tendo em vista a utilização de cimento CP IV associado à baixa idade de cura. Ressalta-se que a normativa DNIT-ME 434/2021 não sugere nenhum tipo de idade de cura para realização do ensaio; todavia, o *software* MeDiNa trabalha com a idade de cura de 28 dias para avaliar materiais estabilizados quimicamente.

Para o controle do decréscimo do módulo de resiliência inicial adotado como critério de parada, foi utilizado um transdutor de deslocamento do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer) posicionado transversalmente ao êmbolo de aplicação de carga (vide Figura 1), de forma que as deformações eram monitoradas por todo o período de ensaio.

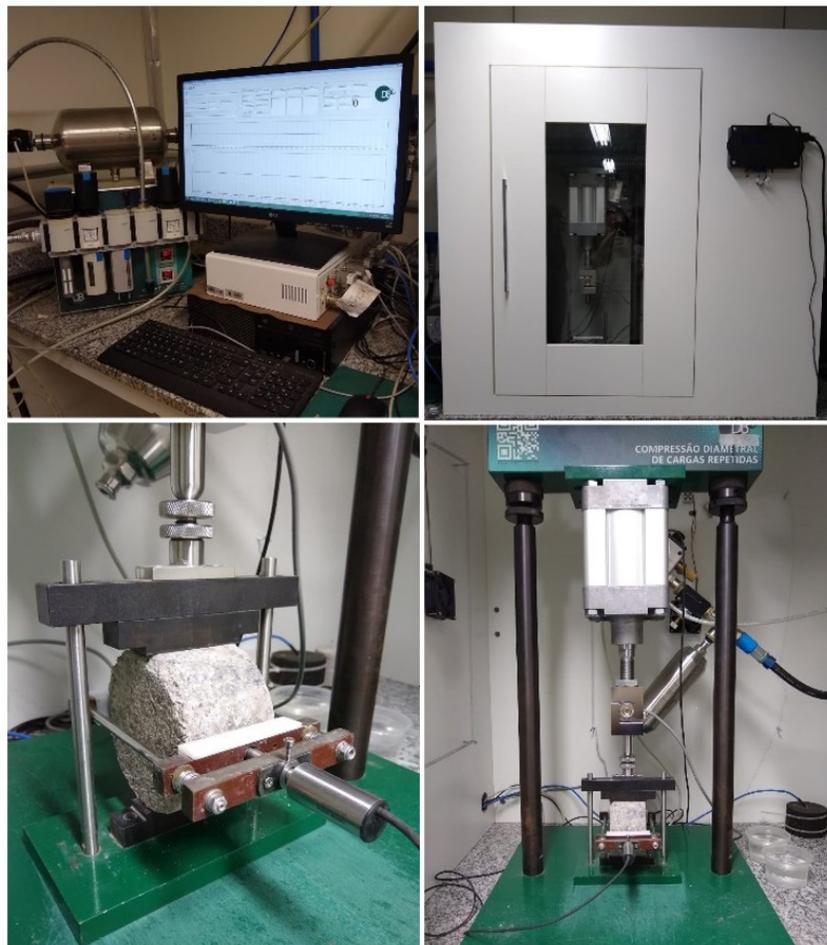


Figura 1. Prensa utilizada para a realização do ensaio de fadiga. Fonte: Back (2022).

A título de resumir o protocolo laboratorial empregado neste trabalho, a Tabela 4 exibe as quantidades de corpos de prova empregados em cada teste, para cada uma das misturas avaliadas, assim como os documentos normativos empregados em cada ensaio.

Tabela 4: Resumo do protocolo laboratorial empregado neste trabalho.

Mistura	RCS		RTF		RTCD		MR		Fadiga	
	Nº de CPs ensaiados	Normativa	Nº de CPs ensaiados	Normativa	Nº de CPs ensaiados	Normativa	Nº de CPs ensaiados	Normativa	Nº de CPs ensaiados	Normativa
SJ (3,5) 28 dias	8	ABNT NBR 5739/2018	8	ABNT NBR 12142/2010	8	DNIT-ME 136/2018	8	DNIT-ME 135/2018	11	DNIT-ME 434/2021
SJ (3,5) 91 dias	8		8		8		8		—	
SJ (5,5) 28 dias	8		8		8		8		10	
SJ (5,5) 91 dias	8		8		8		8		—	
DP (3,5) 28 dias	8		8		8		8		11	
DP (3,5) 91 dias	8		8		8		8		—	
DP (5,5) 28 dias	8		8		8		8		9	
DP (5,5) 91 dias	8		8		8		8		—	

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1. Parâmetros de resistência

A Tabela 5 apresenta os valores de Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração na Flexão (RTF) e de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) das diferentes misturas em função de seu teor de cimento e idade de cura. Os resultados correspondem a média obtida a partir de ensaios em 8 corpos de prova. As colunas “Ganho de RCS, RTF e RTCD (%)” indicam o percentual de acréscimo das respectivas resistências com o aumento da idade de cura de 28 dias para 91 dias.

Tabela 5: RCS, RTF e RTCD das diferentes misturas.

Mistura	Idade Cura (dias)	RCS Média (MPa)	Ganho de RCS (%)	RTF Média (MPa)	Ganho de RTF (%)	RTCD Média (MPa)	Ganho de RTCD (%)
SJ (3,5)	28	3,44	83,60	0,88	67,24	0,56	86,68
	91	6,31		1,47		1,05	
SJ (5,5)	28	5,52	77,34	0,98	88,27	0,95	55,47
	91	9,79		1,85		1,48	
DP (3,5)	28	2,83	51,94	0,44	19,99	0,41	43,15
	91	4,29		0,53		0,59	
DP (5,5)	28	6,91	69,47	1,02	33,69	0,80	59,43
	91	11,72		1,37		1,27	

Conforme identificado numericamente na Tabela 5, todas as misturas exibiram mesma tendência de comportamento, resultando em ganho de resistência (RCS, RTF e RTCD) com o aumento da idade de cura, bem como aumento da resistência mediante incremento no teor de cimento. Este comportamento é análogo àquele observado por White e Gnanendran (2005), Yeo, Jitsangiam e Nikraz (2011) e Lv et al. (2019).

A mistura DP (3,5) foi identificada como a mistura detentora das menores RCS para ambas idades de cura, seguida de SJ (3,5) e SJ (5,5), de forma que a mistura DP (5,5) exibiu os maiores valores de RCS. É válido mencionar que as misturas compostas por diferentes teores de cimento (i.e., 3,5% e 5,5%) exibem leve variação no balanço volumétrico, fazendo com que as misturas com teor de 5,5% sejam levemente mais finas, fato que pode interferir positivamente no desempenho mecânico das misturas.

Em termos numéricos de RTF, as misturas exibiram valores similares aos trabalhos de Yeo (2011), Prado (2018) e Rodrigues (2018). Conforme já mencionado, identifica-se que com o aumento da idade de cura, todas as misturas exibiram ganho de RTF, fato esperado pela utilização de cimento pozolânico CP IV. Destaca-se que as misturas compostas pela rocha Riodacito (DP) exibiram menores taxas de ganho de resistência (19,99% e 33,69%), quando comparadas às misturas de rocha Basáltica - SJ (67,24% e 88,27%).

Com relação ao aumento da RTF em comparação ao incremento do teor de cimento, DP (91 dias) exibiu a maior taxa de crescimento, fato justificado novamente pelo desempenho inferior exibido pela mistura DP (3,5) aos 91 dias, quando comparado às demais misturas avaliadas neste trabalho. Acredita-se que a absorção significativamente alta (2,35% para a fração pedrisco) da rocha ígnea extrusiva ácida – Riodacito, utilizada nas misturas DP, demande maiores teores de cimento para alcançar ligações cristalinas que fortaleçam as propriedades de resistência à tração da mistura cimentada.

Em relação aos resultados obtidos com o teste de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), é possível identificar relevantes taxas de ganho de RTCD com aumento da idade de cura de 28 para 91 dias nas misturas SJ (3,5), SJ (5,5) e DP (5,5). Os acréscimos foram de respectivamente 86,68%, 55,47% e 59,43%. Para a mistura DP (3,5), observa-se, assim como ocorrido para RTF, o menor ganho percentual de RTCD (43,15%) com o aumento da idade de cura. Entende-se que a justificativa para este fato está atrelada a alta absorção do agregado utilizado na mistura DP, conforme já mencionado no parágrafo anterior.

Tendo em vista o significativo impacto do teor de cimento e da idade de cura nos resultados de resistência, procurou-se também identificar, estatisticamente, se o tipo de agregado empregado nas misturas teve associação significativa com os resultados de resistência. Para tal, foi utilizada a ferramenta estatística de análise de variância (ANOVA), com nível de confiabilidade adotado de 95% (nível de significância igual a 5%, ou seja, $\alpha=0,05$).

Como conclusão do teste ANOVA, pode-se constatar que os resultados de RTF e RTCD tiveram associação significativa com o tipo de agregado empregado na mistura; ou seja, a matriz rochosa influenciou nos resultados de RTF e RTCD.

Acredita-se que a maior massa específica por parte da rocha SJ – Basalto (2,87 g/cm³) refletiu no melhor desempenho em termos de RTF e RTCD quando comparado à rocha DP – Riodacito (2,50 g/cm³). Este argumento pode ser fortalecido com os resultados de absorção dos agregados, uma vez que o basalto avaliado possui absorção na ordem de 1,2%, enquanto o riodacito avaliado possui absorção na ordem de 2,3%. Sabe-se que a absorção está diretamente atrelada com a efetividade da ligação cristalina entre as partículas, fato gerado pelas reações de hidratação do cimento.

Para os resultados de RCS, o teste não indicou associação significativa entre o tipo de agregado utilizado na mistura e os resultados de resistência. Os resultados detalhados da análise estatística estão expostos em Back (2022).

3.2. Parâmetro de rigidez

A Tabela 6 engloba os valores de Módulo de Resiliência (MR) diametral médio das misturas em função de seu teor de cimento e idade de cura. Tendo em vista que a normativa DNIT (2018a), utilizada para determinação dos valores de MR, demanda os resultados prévios de RTCD oriundos de DNIT (2018b), optou-se por adicionar também na Tabela 6 os resultados de RTCD já previamente expostos na Tabela 5. Os resultados expostos correspondem a média obtida a partir de ensaios em 8 corpos de prova. As colunas “Ganho de RTCD(%) e MR (%)” indicam o percentual de acréscimo da respectiva resistência e módulo resiliente com o aumento da idade de cura de 28 dias para 91 dias.

Tabela 6: Módulo de Resiliência das diferentes misturas.

Mistura	Idade Cura (dias)	RTCD Média (MPa)	Ganho de RTCD (%)	MR Médio (MPa)	Ganho de MR (%)
SJ (3,5)	28	0,56	86,68	18750	47,94
	91	1,05		27738	
SJ (5,5)	28	0,95	55,47	24731	25,17
	91	1,48		30955	
DP (3,5)	28	0,41	43,15	13634	51,38
	91	0,59		20638	
DP (5,5)	28	0,80	59,43	19990	37,11
	91	1,27		27407	

Percebe-se que as misturas apresentaram tendência de classificação de desempenho significativamente similar àquela exposta nos resultados de RTCD. Novamente, é possível identificar o relevante valor de rigidez de SJ (3,5). A referida mistura alcança valores de módulo resiliente significativamente próximos a DP (5,5). Ainda, observa-se os menores resultados de rigidez, em comparação às demais misturas, por parte de DP (3,5). Em termos de taxa de crescimento da rigidez devido ao incremento de 3,5% para 5,5% no teor de cimento, conforme ocorrido para os parâmetros de resistência previamente apresentados, os módulos de resiliência de todas as misturas aumentaram com o acréscimo do teor de cimento. Os acréscimos foram mais significativos na idade de cura de 28 dias, onde o aumento do teor de cimento de 3,5% para 5,5% acarretou em um ganho de 31,90% de rigidez na mistura SJ e 46,62% na mistura DP.

Ainda, em termos absolutos, observa-se que as misturas compostas por agregado de origem basáltica (SJ) apresentaram maiores valores de MR, especialmente quando trabalhadas com o teor de cimento 3,5%. Entende-se que a justificativa para tal comportamento está atrelada a porosidade e ao índice “ $\eta / C\%$ ”. Este índice representa a relação entre a porosidade (η) expressa em porcentagem, e teor volumétrico de cimento, expressa em porcentagem do volume de cimento total ($C\%$).

No trabalho de Back (2022), documento base para a elaboração deste artigo, foi realizada uma relação entre o MR, porosidade e o índice “ $\eta / C\%$ ” com as quatro misturas apresentadas neste documento. Da mesma forma que SJ (3,5) exibiu os maiores valores de MR em relação às demais misturas, seus parâmetros de porosidade corroboram para a justificativa de tal performance, exibindo

menores porosidades dentre as misturas (tanto para 28 quanto para 91 dias). A mesma análise pode ser realizada para DP (3,5), que apresentou maior oscilação na porosidade, passando a ser classificada como a pior mistura dentre às 4 avaliadas neste trabalho. As interpretações da autora indicam que índice “ $\eta / C\%$ ” se mostrou eficiente na avaliação do MR, levando em consideração o nível de compactação/porosidade e cimentação das misturas avaliadas.

Assim como ocorrido para os resultados dos parâmetros de resistência, os resultados de rigidez também foram submetidos ao teste com a ferramenta estatística de análise de variância (ANOVA), com nível de confiabilidade adotado de 95% (nível de significância igual a 5%, ou seja, $\alpha=0,05$). Como conclusão do teste ANOVA, constatou-se que os resultados de MR tiveram associação significativa com o tipo de agregado empregado na mistura; ou seja, a matriz rochosa influenciou nos resultados de MR. Os resultados detalhados da análise estatística estão expostos em Back (2022).

3.3. Comportamento à fadiga

Os resultados referentes ao comportamento a fadiga das misturas cimentadas avaliadas neste trabalho foram representados em curvas de formato semi-logarítmico, que correlacionam o número de ciclos para redução do 60% do MR inicial e o percentual de relação entre tensões, vide Figura 2. Ressalva-se que não foi possível alcançar o R^2 mínimo de 0,80 recomendado pela normativa DNIT-ME 434/2021 (DNIT, 2021a) para os testes de fadiga da mistura DP (3,5). Este fato ocorreu devido às dificuldades operacionais atreladas ao ensaio de fadiga por compressão diametral, uma vez que o tempo necessário para ruptura das amostras estendeu relevantemente o protocolo experimental. Mesmo assim, entende-se como consistente o resultado, visto que a regressão experimental exhibe resultados significativamente próximos da mistura SJ (3,5), que alcançou o coeficiente de determinação mínimo estabelecido pela referida normativa.

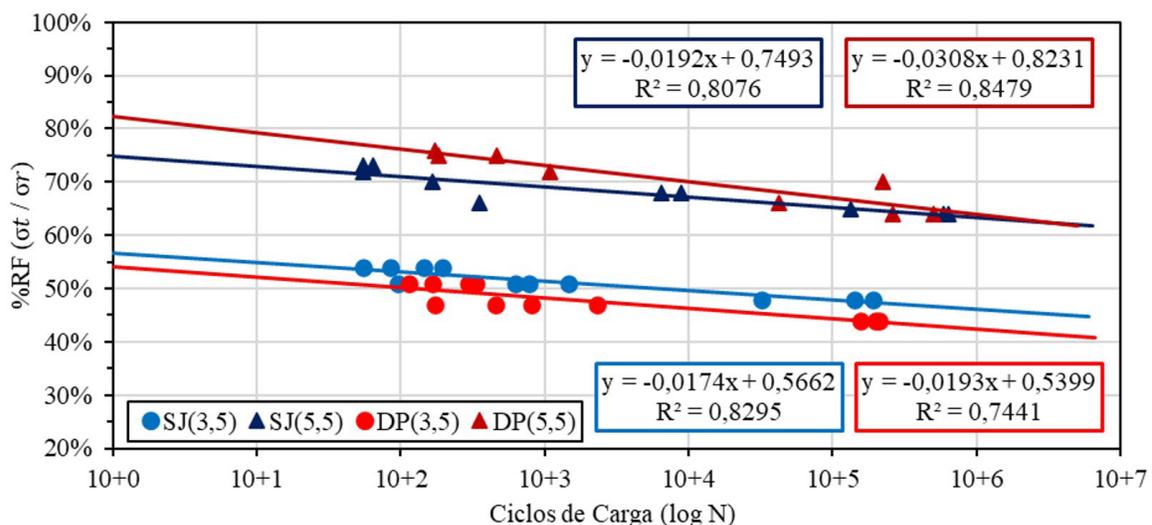


Figura 2: Vida de Fadiga em função da Relação entre Tensões.

Cabe ressaltar que, pela abordagem tradicional do fenômeno de fadiga, avalia-se a degradação mediante redução do MR inicial. A Figura 3 ilustra o comportamento típico do decréscimo do MR inicial identificado para misturas BGTC da presente pesquisa, similares às ilustrações apresentadas por Sounthararajah et al. (2018) e Midgley e Yeo (2008). Tais ilustrações são dados de saída presentes na interface do *software* SEEPAV 8200, referentes a dois corpos de prova ensaiados neste trabalho.

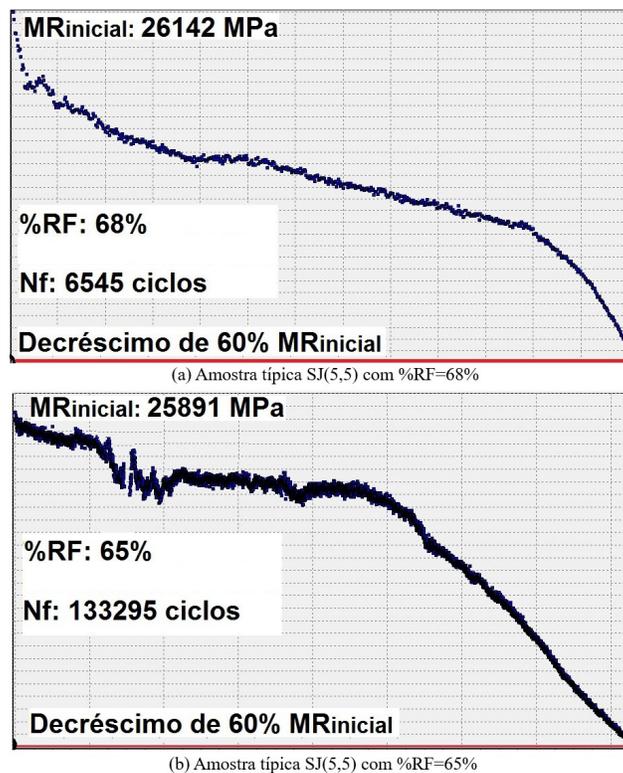


Figura 3: Comportamento típico do decréscimo do MR inicial em função do número de ciclos identificado nas misturas cimentadas para a redução de 60% do MR inicial (ensaio de fadiga). Fonte: Back (2022).

Conforme identificado por Theyse, De Beer e Rust (1996), é possível identificar três fases diferentes para o trincamento por fadiga: a fase pré-fissurada (exibe redução do módulo em grande velocidade), fase de vida efetiva de fadiga (diminuição do módulo em uma taxa relativamente mais lenta) e a fase de equivalente granular (módulo exibe drástica redução de forma que a amostra tende a falhar após algumas centenas de ciclos adicionais).

Com relação à performance das misturas cimentadas, percebe-se que SJ (5,5) e DP (5,5) exibiram desempenho significativamente superior frente ao trincamento por fadiga em comparação com as misturas elaboradas com menor teor de cimento (SJ (3,5) e DP (3,5)). Todavia, considerando as tendências geradas pelo formato matemático de regressão, não há como afirmar qual agregado proporciona o melhor desempenho à fadiga, uma vez que os resultados são significativamente próximos em cada teor de cimento avaliado.

Utilizando como referência os critérios de vida de fadiga adotado pela Austroads (2008), que indica que 1.000.000 de ciclos é o valor alvo que uma mistura BGTC deva atingir como valor efetivo de fadiga, foi identificado que para as misturas SJ (3,5) e DP (3,5) este patamar é alcançado para um %RF de 46% e 42%, respectivamente. Já para as misturas SJ (5,5) e DP (5,5), este patamar é alcançado em %RF de 64% para ambas. Ou seja, entende-se que, caso a BGTC estiver submetida a um %RF menor que este, alcançará a vida de fadiga efetiva esperada.

O comportamento de degradação acelerada exibido pelas misturas, em especial para àquelas com menores teores de cimento, em adição à baixa capacidade de suporte às tensões máximas durante o ensaio de fadiga, está relacionado a pequena quantidade de pasta de cimento, incapaz de causar o envolvimento completo de grande parte do agregado. Este fato, somado à estrutura de nucleação de vazios, resulta em acelerada propagação de fissuras.

Todavia, acredita-se que o fator preponderante no desempenho aquém de tais materiais está inserido na idade de cura de 28 dias, uma vez que o processo de hidratação do cimento CP IV ainda se mostrou ativo aos 91 dias, com ganhos pronunciados de RTCD. Conforme exposto previamente, SJ (5,5) exibiu ganho de RTCD de 55,47% entre 28 dias e 91 dias (0,95 MPa para 1,48 MPa), enquanto que DP (5,5) apresentou o incremento de 59,43% de RTCD (0,80 MPa para 1,27 MPa). Cabe salientar que a normativa DNIT (2021a) não sugere nenhum tipo de idade de cura para realização do ensaio; todavia, o *software* MeDiNa trabalha com a idade de cura de 28 dias para materiais estabilizados quimicamente.

Conforme estudos de fadiga flexural em misturas cimentadas publicadas por Sountharajah et al. (2018) e Lv et al. (2019), a partir dos resultados dos ensaios de resistência em materiais cimentados sob diferentes períodos de cura, pode-se observar que a resistência tendeu à estabilização após 90 dias (para utilização de cimento com alto ganho de resistência inicial), de forma que o aumento do período de cura promoveu melhora substancial no desempenho à fadiga sob o mesmo nível de tensão aplicada, de modo a simular a mesma carga de tráfego para diferentes períodos de cura.

3.4. Análise mecanicista dos materiais cimentados

Desde 2014, mediante Nota Técnica 123/2014 – DNIT/DPP, acórdão 1994/2013-TCU-Plenário – exige-se o uso de métodos mecanicistas/estruturais aplicados ao cálculo de pavimentos rodoviários, para tráfego superior a 5×10^7 repetições de um eixo padrão. Para tráfegos nesta magnitude, as misturas estabilizadas por cimento são frequentemente cogitadas para avaliação em projeto ou efetiva aplicação em pista; todavia, as técnicas mecanicistas que atendem a esta exigência feita pela Nota Técnica 123/2014 são baseadas na mecânica clássica dos pavimentos, atentando-se apenas para os valores de rigidez dos materiais e as deformações de tração geradas no revestimento asfáltico, sem observar as propriedades de danificação (curva de fadiga do material). Neste modo de avaliação, que ignora a possibilidade de ocorrência de fadiga na base cimentada, resultam-se interpretações relativamente rasas.

Neste trabalho, para realizar a análise mecanicista dos pavimentos compostos por materiais cimentados nas camadas estruturais, optou-se pela utilização do sistema de dimensionamento de pavimentos compilado no MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional, versão 1.1.9.0). A elaboração de projetos de pavimentos com a plataforma MeDiNa está regulamentada pela Instrução de Serviço IS-247 (DNIT, 2021b). Os detalhes de operação do programa principal e suas ferramentas complementares estão descritos em Brasil (2023). Neste trabalho, concentraram-se as avaliações de desempenho dos materiais estabilizados apenas no mecanismo de ruptura por fadiga do pavimento, atrelado ao comportamento do módulo resiliente do material cimentado ao longo do tempo.

Deve-se ressaltar que, para fins de utilização de camadas cimentadas como componentes estruturais no MeDiNa, os materiais devem ser inseridos no programa com suas características básicas e o seu comportamento frente aos parâmetros de rigidez e danificação.

Tratando-se das informações de rigidez, demandam-se resultados do módulo resiliente da camada cimentada. Ressalta-se que as camadas estabilizadas são tratadas no programa MeDiNa como materiais que possuem propriedades elásticas que variam ao longo da vida de serviço. Por isso, a análise é realizada mensalmente, considerando um MR que decai a cada mês, com comportamento do tipo sigmoidal, variando entre dois limites: o Limite Superior representa a camada nova, que ainda não sofreu nenhum dano de fadiga; e o Limite Inferior representa a situação em que a camada atingiu sua vida de fadiga e está totalmente trincada, com comportamento próximo a de

uma camada granular (Brasil, 2023). A Equação 2 exibe a função sigmoideal adotada pelo software para representar o comportamento das camadas estabilizadas quimicamente ao longo do tempo, sob o ponto de vista de sua rigidez.

$$MR = MR_{\text{mín}} + \frac{MR_{\text{máx}} - MR_{\text{mín}}}{1 + e^{-4+14D_i}} \quad (2)$$

Em que:

D_i = dano de fadiga;

MR = Módulo de resiliência (MPa);

$MR_{\text{máx}}$ = Módulo de resiliência inicial da camada estabilizada (limite superior), definido pelo projetista a partir de resultado de ensaio laboratorial (MPa);

$MR_{\text{mín}}$ = Módulo de resiliência final da camada estabilizada (limite inferior), definido pelo projetista com valor semelhante ao módulo de resiliência de um material equivalente, sem o estabilizante (MPa).

O módulo inicial ou o limite superior foi adotado em conformidade com os resultados obtidos pelos ensaios em compressão diametral, previamente expostos no item 3.2. Para o módulo final (limite inferior), adotou-se um módulo típico de Britas Graduadas Simples (BGS), com rigidez de 200 MPa, com base nos trabalhos de Fernandes Jr. (1994), Ribas (2014), Santos (2015) e Bueno (2016, 2019).

Tratando-se do comportamento específico do material frente a danificação por fadiga, o modelo de dano por fadiga considerado no programa MeDiNa é estabelecido em função da relação (%RF) entre a tensão de tração na fibra inferior da camada cimentada e a resistência à tração por compressão diametral do material aos 28 dias (Brasil, 2023). Utilizou-se assim, os resultados apresentados previamente no item 3.3, adaptados a Equação 1, exposta no item 2.1.1, para inserção das características das misturas BGTC no programa MeDiNa. Desta forma, o protocolo demandado pelo programa foi seguido integralmente pelo presente trabalho, para as quatro misturas cimentadas utilizadas na análise mecanicista.

Deve-se ressaltar que, na literatura nacional, são escassos os relatos de avaliação mecanicista de materiais estabilizados quimicamente com o protocolo completo de caracterização. Usualmente, os materiais cimentados são analisados em plataformas mecanicistas sem informações referentes a curva de fadiga do material.

Ainda, nesta análise mecanicista, optou-se por trabalhar com dois tráfegos típicos (Tráfego 1 – 1×10^7 e Tráfego 2 – 5×10^7), descritos por Ceratti, Bernucci e Soares (2015) como “Alto volume de tráfego: $10^7 < N \leq 5 \times 10^7$ ” e “Muito pesado volume de tráfego: $N \geq 5 \times 10^7$ ”. Inicialmente, procurou-se definir uma estrutura típica de referência, classificada como “Flexível”, que atendesse a cada um dos 2 níveis de tráfego avaliados neste estudo.

Para os níveis de tráfego deste estudo, de acordo com Brasil (2023), é necessária a utilização de misturas asfálticas Classe 4 como material de revestimento. Deste modo, utilizou-se da mistura asfáltica Classe 4 presente na base de dados do MeDiNa para revestir as estruturas analisadas neste trabalho (Brasil, 2023). Para compor o restante do conjunto estrutural, optou-se por trabalhar com materiais constituintes da base de dados do programa. Utilizou-se da “Brita Graduada Gnaisse C7” para compor as camadas de base e sub-base granular e subleito de “Solo Fino NA” para representar a fundação do pavimento.

Os autores entendem que trabalhar com dados oriundos da base de informações de materiais do MeDiNa não implicam na situação ideal de projeto. Todavia, como neste trabalho o intuito consiste

em avaliar o desempenho apenas das misturas BGTC, isolando as demais variáveis, acredita-se que o uso de materiais da base de dados para o subleito, camadas granulares e revestimento possibilita que os impactos gerados nos resultados sejam transferidos apenas para as misturas cimentadas, considerando materiais padronizados nas demais camadas da estrutura. De qualquer forma, para utilização de materiais típicos do estado do Rio Grande do Sul em revestimentos, bases granulares e subleitos, recomenda-se os resultados presentes nos trabalhos de Custódio (2022), Sagrilo (2024) e Pascoal (2024), respectivamente.

Com os materiais definidos, foram dimensionadas duas estruturas flexíveis de referência, que atendessem as necessidades estruturais dos dois níveis de tráfego em estudo, tendo como objetivo resistir ao mecanismo de ruptura por fadiga ao longo da vida útil de projeto (10 anos). Os conjuntos estruturais resultantes do dimensionamento estão expostos na Tabela 7.

Tabela 7: Resultado do dimensionamento das estruturas de referência.

Tráfego 1 (1×10^7)		Tráfego 2 (5×10^7)	
Material	Espessura (mm)	Material	Espessura (mm)
CA Classe 4	81	CA Classe 4	200
BGS Gnaiss C7	250	BGS Gnaiss C7	400
BGS Gnaiss C7	250	BGS Gnaiss C7	400
Subleito Solo Fino NA	Semi-infinito	Subleito Solo Fino NA	Semi-infinito

Com os resultados dos dimensionamentos de pavimentos flexíveis, incorporados a este trabalho como estruturas de referência, objetivou-se verificar o efeito dos materiais cimentados avaliados neste trabalho em substituição às camadas de base e sub-base dos pavimentos de referência dimensionados com materiais puramente granulares, avaliando os seus impactos na vida de fadiga do pavimento ao longo do período de projeto. Nesta substituição, as espessuras das camadas granulares obtidas nas estruturas de referência não foram alteradas.

Para possibilitar o completo entendimento dos parâmetros empregados na análise mecanicista realizada, a Tabela 8 e a Tabela 9 exibem, respectivamente, os parâmetros de entrada no *software* MeDiNa dos materiais cimentados desenvolvidos nesta pesquisa e dos demais materiais da estrutura de referência, oriundos da base de dados do sistema. Ressalta-se que não foram considerados os parâmetros de deformação permanente das camadas, uma vez que este mecanismo de ruptura não foi avaliado por esta análise mecanicista. Ainda, na Tabela 9, referente aos materiais de referência, foram suprimidos alguns parâmetros de controle, que não tem impacto no cálculo de tensões, deformações e deslocamentos realizados pelo programa.

3.4.1. Misturas BGTC implementadas em camada de Sub-base

Inicialmente, buscou-se trabalhar com a estrutura de referência dimensionada para o Tráfego 1, com aplicação das misturas cimentadas SJ (3,5), SJ (5,5), DP (3,5) e DP (5,5) em substituição ao material de sub-base, inferindo ao pavimento uma configuração de estrutura semirrígida, em formato invertido. A espessura de material granular de sub-base (250 mm, oriunda do processo de dimensionamento de referência para o Tráfego 1) foi mantida para a utilização das misturas cimentadas, apenas com substituição do material na análise.

Nas condições de Tráfego 1, para ambas as misturas com teor de cimento igual a 3,5% (SJ e DP), utilizadas na camada de sub-base, o programa MeDiNa emite um alerta de dimensionamento, informando ao projetista que o Módulo da camada estabilizada decaiu rapidamente em um período.

Tabela 8: Parâmetros de entrada dos materiais cimentados deste trabalho no MeDiNa.

Parâmetro	SJ (3,5)	SJ (5,5)	DP (3,5)	DP (5,5)
Coeficiente de Poisson	0,25	0,25	0,25	0,25
MR Sigmoidal (MPa)				
Ei (MPa)	18750	24731	13634	19990
Ef (MPa)	200	200	200	200
Constante A	-4	-4	-4	-4
Constante B	14	14	14	14
Teor de Cimento (%)	3,5	5,5	3,5	5,5
Resistência à Tração (MPa)	0,57	0,95	0,41	0,80
Massa Específica (g/cm ³)	2,545	2,535	2,227	2,235
Umidade Ótima (%)	6,90	7,10	8,50	7,75
Energia de Compactação	Modificada	Modificada	Modificada	Modificada
Fadiga				
k1	27,594	32,185	21,702	23,258
k2	-47,806	-42,068	-38,637	-27,534

Tabela 9: Parâmetros de entrada dos materiais da estrutura de referência no MeDiNa.

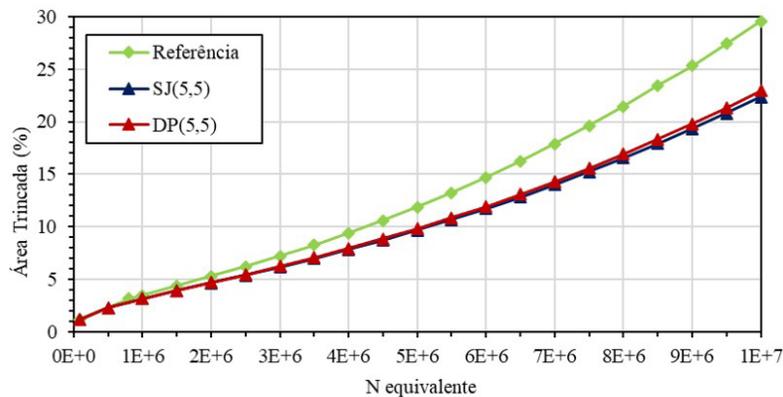
Concreto Asfáltico “CA Classe 4”	
Coeficiente de Poisson	0,30
MR Linear (MPa)	10492
Massa Específica (g/cm ³)	2,400
Curva de Fadiga	
k1	$1,91 \times 10^{-5}$
k2	-1,9
Classe de Fadiga	4
FFM	1,00
Material Granular “BGS Gnaisse C7”	
Coeficiente de Poisson	0,35
MR Linear (MPa)	350
Massa Específica (g/cm ³)	2,244
Subleito “Solo Fino NA”	
Coeficiente de Poisson	0,45
MR Não Linear (MPa)	
k1	784,88
k2	0,340
k3	0
k4	0
Massa Específica (g/cm ³)	1,820

Este fato ocorre devido ao formato incorporado ao programa, que contempla tanto os parâmetros de rigidez quanto de danificação dos materiais estabilizados quimicamente. No sistema, ao analisar

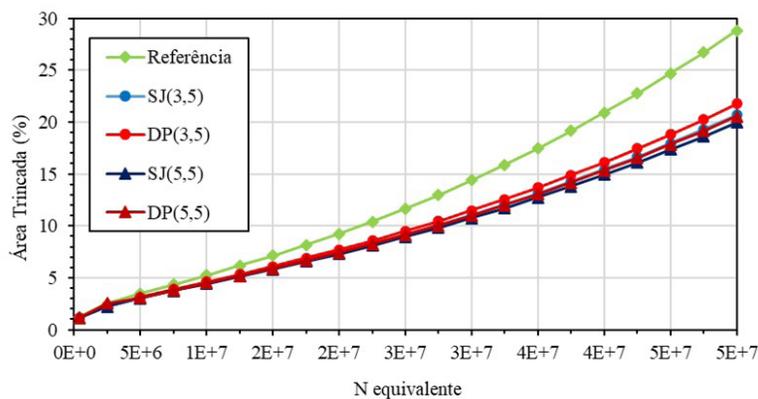
o pavimento, quando o módulo de resiliência (que também é dependente do dano por fadiga), decai mais do que 25% do valor em apenas um período, o programa emite um alerta informando que o módulo decaiu rapidamente. Fisicamente, o que ocorre é que, para as misturas cimentadas com teor de cimento igual a 3,5%, o dano por fadiga calculado a partir dos parâmetros laboratoriais da curva de fadiga do material são elevados, causando rápido trincamento no material e consequente perda de rigidez, conferindo rapidamente a esta camada um comportamento análogo a um material granular.

Interpreta-se que o principal responsável por esta ação seja a baixa RTCD quantificada para os materiais cimentados deste trabalho dosados com teores de cimento iguais a 3,5%. Os valores médios de RTCD, respectivamente de 0,57 MPa e 0,41 MPa para SJ (3,5) e DP (3,5), são significativamente baixos quando comparados às tensões de tração que efetivamente ocorrem nas camadas cimentadas avaliadas com o MeDiNa, fazendo com que o trincamento do material ocorra de maneira acelerada, acarretando na perda de rigidez. Por este formato de análise, que avalia o material estabilizado quimicamente com base nos seus parâmetros de rigidez e danificação, as misturas SJ (3,5) e DP (3,5) não seriam passíveis de aplicação em campo, em formato de pavimento semirrígido invertido.

Para as misturas com teor de cimento igual a 5,5%, os resultados são distintos. A melhora nos resultados de resistência à tração dos materiais (0,95 MPa e 0,80 MPa para SJ (5,5) e DP (5,5), respectivamente), atrelada ao formato da curva de fadiga, faz com que a utilização destas misturas seja viável em formato de pavimentos semirrígidos invertidos. Quando comparados à estrutura de referência, a utilização das misturas SJ (5,5) e DP (5,5) na sub-base do pavimento, mantendo a espessura original, tem previsão de trincamento no revestimento asfáltico realizada pelo programa MeDiNa, para um período de projeto de 10 anos, conforme gráfico exposto na Figura 4a.



(a) Tráfego 1



(b) Tráfego 2

Figura 4: Evolução da Área Trincada para diferentes configurações.

Pelo gráfico da Figura 4a, percebe-se que as estruturas com incorporação dos materiais cimentados na camada de sub-base têm comportamento praticamente idêntico entre si. Em ambos os casos (SJ (5,5) e DP (5,5)), a previsão de trincamento por fadiga do pavimento ao final do período de projeto seria de aproximadamente 22%. Este número representa uma melhora quando comparado ao percentual obtido com a estrutura de referência (29%). Entende-se que a diferença é pequena, de forma que em casos práticos, com situações análogas a esta, a utilização dos materiais cimentados em detrimento dos materiais granulares teria sua viabilidade econômica verificada, em paralelo ao desempenho estrutural.

Ainda, considerando os resultados expostos na Figura 4a, pode-se sugerir uma otimização em relação a espessura da camada de revestimento asfáltico do pavimento investigado (81 mm - referência), uma vez que a inserção dos materiais cimentados demonstra uma certa “margem” em relação ao percentual limite de trincamento por fadiga (30%) ao longo do período de projeto (10 anos). Esta otimização resultou, quando incorporada à camada de sub-base os materiais SJ (5,5) e DP (5,5), em um revestimento asfáltico de 58 mm, para ambos os casos. Tal redução na espessura do revestimento asfáltico também pode balizar decisões econômicas e executivas de projetos reais de pavimentos rodoviários.

Para a condição de Tráfego 2, diferentemente do ocorrido para a estrutura referência projetada para o Tráfego 1, ambos teores de cimento tiveram resultados positivos durante sua avaliação com o MeDiNa. Entende-se que este fato ocorre pois, para a estrutura do Tráfego 2, a robustez do sistema estrutural do dimensionamento de referência garante a chegada de menores tensões de tração na camada de material estabilizado, localizada na sub-base.

Desta forma, a curva de fadiga e o módulo de resiliência variável ao longo do tempo não são impactados de maneira tão significativa pelas tensões de tração elevadas, uma vez que o conjunto estrutural é mais robusto, garantindo redução nas tensões existentes na camada estabilizada quimicamente.

Assim, quando se compara a estrutura de referência com os conjuntos estruturais compostos pelas misturas SJ (3,5), SJ (5,5), DP (3,5) e DP (5,5) na sub-base do pavimento, mantendo-se as mesmas espessuras dos materiais projetados para o Tráfego 2, a previsão de trincamento no revestimento asfáltico realizada pelo programa MeDiNa ocorre conforme gráfico exposto na Figura 4b.

Percebe-se que a substituição do material granular por material cimentado na camada de sub-base da estrutura de referência causou redução na evolução do trincamento por fadiga do revestimento asfáltico ao longo do período de projeto. Esta “margem” no percentual de área trincada ao longo do período de projeto permite que sejam otimizadas as espessuras do revestimento asfáltico dimensionado para a condição de Tráfego 2 (200 mm). Quando adotado o material DP (3,5) na camada de sub-base, a espessura de revestimento pode ser reduzida para 185 mm. Quando é empregado o material SJ (3,5) na camada de sub-base, a espessura reduz para 181 mm. Na opção de utilização dos materiais estudados neste trabalho com maiores teores de cimento na camada de sub-base, as camadas otimizadas de concreto asfáltico reduzem a magnitude de 178 mm para SJ (5,5) e 182 mm para DP (5,5).

3.4.2. Misturas BGTC implementadas em camada de Base

Concluídas as análises referentes a utilização dos materiais cimentados deste trabalho como camada sub-base em pavimentos semirrígidos em formato invertido, iniciaram-se às avaliações dos materiais estudados como camadas de base estrutural. O formato de avaliação foi análogo aquele abordado nas estruturas invertidas; porém, neste momento, foram substituídas as camadas

de base granular dos dimensionamentos de referência, para os dois níveis de tráfego abordados, pelos materiais cimentados SJ (3,5), SJ (5,5), DP (3,5) e DP (5,5).

Primeiramente, buscou-se avaliar a utilização das misturas cimentadas neste trabalho como substituição à camada de base granular na estrutura de referência dimensionada para a condição de Tráfego 1. Para este caso, quando as quatro misturas investigadas neste trabalho foram utilizadas na camada de base, o sistema informou, em todas as situações, o seguinte alerta durante a análise mecanicista: “Módulo da camada estabilizada decaiu rapidamente em um período.” Este fato significa que a danificação na camada cimentada foi elevada, devido à alta magnitude das tensões de tração que alcançam a camada de base do pavimento. Com esta ação, o processo de danificação por fadiga na camada cimentada, simulada pelo programa, acarretou em rápido decréscimo na curva de módulo do material, tornando a camada estabilizada um material puramente granular.

Com este resultado, interpreta-se que, para a condição estrutural dimensionada para o Tráfego 1, as misturas cimentadas estudadas neste trabalho não têm aplicabilidade para utilização nas camadas de base. Nesta mesma condição de tráfego, verificou-se previamente que as misturas SJ (5,5) e DP (5,5) tem aplicabilidade no formato semirrígido invertido, uma vez que as tensões de tração que alcançam a sub-base da Estrutura de Referência para o Tráfego 1 são menores do que as tensões de tração que alcançam a camada de base.

Para as condições de Tráfego 2, quando são incorporadas as curvas de fadiga dos materiais cimentados ao protocolo de análise, as conclusões obtidas com uso das misturas SJ (3,5) e DP (3,5) são idênticas aquelas obtidas para o dimensionamento obtido com o Tráfego 1. Ou seja, para as referidas misturas, quando empregadas na camada de base, o programa MeDiNa emite o mesmo alerta mencionado anteriormente nas condições de Tráfego 1, indicando que danificação na camada cimentada foi elevada, devido à alta magnitude das tensões de tração que alcançam a camada de base do pavimento, quando comparadas a curva de fadiga do material. Com esta ação, o processo de danificação por fadiga na camada cimentada, simulada pelo programa, acarretou em rápido decréscimo na curva de módulo do material, tornando a camada estabilizada um material puramente granular.

Entende-se assim que, para a estrutura dimensionada nas condições de Tráfego 2, as misturas cimentadas SJ (3,5) e DP (3,5) não possuem capacidade estrutural para serem utilizadas na camada de base.

Os resultados obtidos para as misturas SJ (5,5) e DP (5,5) são opostos àqueles encontrados para os materiais com menor teor de cimento. O acréscimo de material aglutinante atribui às misturas melhores propriedades de resistência, rigidez e danificação, fazendo com que estas misturas, quando utilizadas como camadas de base do pavimento dimensionado para a condição de Tráfego 2, impactem em melhor desempenho estrutural, quando comparadas a situação de referência.

A Figura 5 exibe a previsão de trincamento no revestimento asfáltico realizada pelo programa MeDiNa, quando utilizadas distintas opções de materiais na camada de base (Referência, SJ (5,5) e DP (5,5)) para um período de projeto de 10 anos.

Percebe-se que, ao contrário do ocorrido para as condições de pavimento semirrígido invertido, avaliado nas condições de Tráfego 2, para o formato semirrígido com uso dos materiais SJ (5,5) e DP (5,5) na camada de base, os impactos no trincamento por fadiga do revestimento asfáltico, ao longo da vida útil de projeto são relevantes. O mesmo formato estrutural consegue reduzir de aproximados 30% ao final dos 10 anos (estrutura de referência) para aproximados 5% ao término do período de projeto, com uso dos materiais cimentados.

Pode-se também sugerir uma otimização em relação à espessura da camada de revestimento asfáltico do pavimento investigado para a condição de Tráfego 2 (200 mm), uma vez que a inserção dos materiais cimentados demonstra significativa “margem” em relação ao percentual limite de

trincamento por fadiga (30%) ao longo do período de projeto (10 anos). Esta otimização resultou, quando incorporada à camada de base o material SJ (5,5), em um revestimento asfáltico de 50 mm. Quando utilizado como base do pavimento o material DP (5,5), a espessura otimizada do revestimento asfáltico também resultou em 50 mm. Estas reduções de 150 mm de material asfáltico são de relevante magnitude executiva e econômica, podendo assim balizar decisões em projetos reais de pavimentos rodoviários.

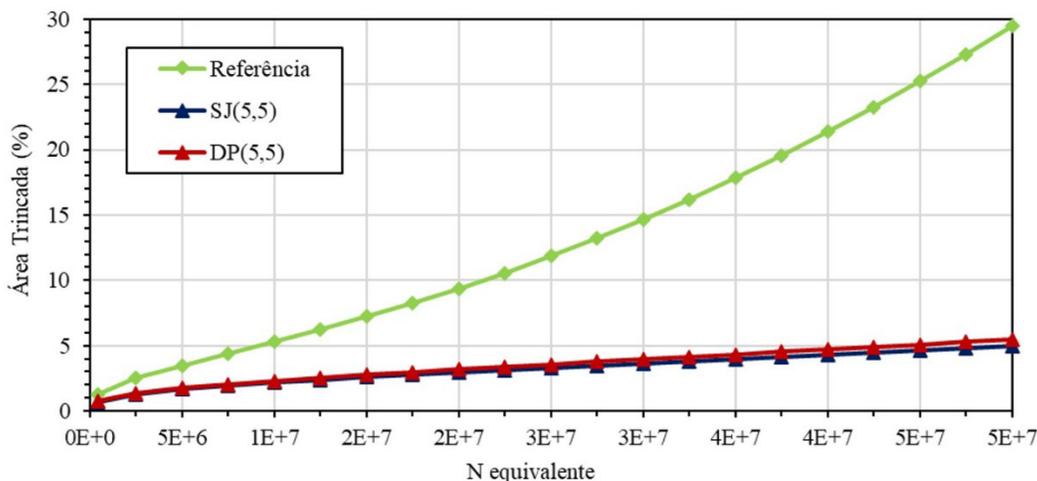


Figura 5: Evolução da Área Trincada para diferentes configurações – Tráfego 2.

A título de consolidação dos resultados obtidos na análise mecanicista deste trabalho, a Tabela 10 exibe um resumo das espessuras otimizadas de concreto asfáltico (CA) ao utilizar misturas cimentadas em relação aos materiais de referência, tanto na camada de sub-base quanto na camada de base, com ambas as condições de tráfego avaliadas (Tráfego 1 e Tráfego 2). A indicação “Não Adequado” representa que, de acordo com a análise mecanicista realizada neste trabalho, o material cimentado foi considerado inadequado para utilização em substituição ao material puramente granular. Este fato significa que a danificação na camada cimentada foi elevada, devido à alta magnitude das tensões de tração que alcançam a camada de base do pavimento. Com esta ação, o processo de danificação por fadiga na camada cimentada, simulada pelo programa, acarretou em rápido decréscimo na curva de módulo do material, tornando a camada estabilizada um material puramente granular.

Tabela 10: Resumo das espessuras otimizadas de CA com utilização das misturas cimentadas nas camadas de sub-base e base.

Modalidade de Análise		Material Cimentado na Sub-base			Material Cimentado na Base		
		CA Referência (mm)	CA Otimizado (mm)	Redução de CA (mm)	CA Referência (mm)	CA Otimizado (mm)	Redução de CA (mm)
Tráfego 1	SJ (3,5)	81	Não Adequado		81	Não Adequado	
	SJ (5,5)		Não Adequado			Não Adequado	
	DP (3,5)		58	23		Não Adequado	
	DP (5,5)		58	23		Não Adequado	
Tráfego 2	SJ (3,5)	200	181	19	200	Não Adequado	
	SJ (5,5)		178	22		50	150
	DP (3,5)		185	15		Não Adequado	
	DP (5,5)		182	18		50	150

Por fim, entende-se que os resultados gerados na análise mecanicista deste trabalho devem ser analisados com parcimônia. Deve-se ressaltar que o programa MeDiNa não contém, em seu framework de calibração, uma função de transferência elaborada especificamente para correlacionar o comportamento laboratório-campo de materiais estabilizados quimicamente. Isto significa que, nas pistas experimentais presentes na base de calibração da função de transferência do sistema de dimensionamento, não há presença de camadas estabilizadas quimicamente nas suas composições estruturais. Este fato, atrelado a não incorporação do processo de reflexão de trincas na análise matemática realizada pelo MeDiNa, limita os resultados fornecidos pelo referido *software*. Sendo assim, o comportamento real das camadas cimentadas em campo pode diferir significativamente do previsto.

Contudo, mesmo feitas as ressalvas necessárias, entende-se que o formato de análise que considera tanto os parâmetros de danificação quanto os parâmetros de rigidez dos materiais seja mais adequado em comparação aos conceitos clássicos da mecânica dos pavimentos. Neste trabalho, o uso das misturas SJ (5,5) e DP (5,5) se mostrou eficiente, no formato semirrígido invertido, nas condições de Tráfego 1. Para as condições de Tráfego 2, todas as misturas cimentadas avaliadas (SJ (3,5) SJ (5,5), DP (3,5) e DP (5,5)) se mostraram superiores, sob o ponto de vista de desempenho, quando comparadas ao material puramente granular, no formato semirrígido invertido.

Para as configurações de pavimento semirrígido com incorporação dos materiais cimentados como camadas de base, obteve-se sucesso, em comparação aos dimensionamentos de referência, apenas no uso das misturas SJ (5,5) e DP (5,5) para atendimento das condições de Tráfego 2. Para o dimensionamento de referência realizado para as condições de Tráfego 1, todas as misturas estabilizadas com cimento exibiram trincamento precoce.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos em acordo com o delinear metodológico deste trabalho, foi possível concluir que, de forma geral, o incremento no teor de cimento (3,5% para 5,5%) promoveu melhora nos parâmetros de resistência, rigidez e comportamento a fadiga para todos os ensaios analisados. De forma análoga, o incremento na idade de cura promoveu ganho de resistência e rigidez em todos os ensaios realizados para obtenção destes parâmetros. Destaca-se que, no que tange à vida de fadiga dos materiais, foram realizados testes apenas em amostras com idade de cura de 28 dias.

A respeito da análise mecanicista desenvolvida com o *software* MeDiNa, foi possível constatar que o uso das misturas SJ (5,5) e DP (5,5) se mostrou eficiente, no formato semirrígido invertido, nas condições de Tráfego 1. Para as condições de Tráfego 2, todas as misturas cimentadas avaliadas (SJ (3,5) SJ (5,5), DP (3,5) e DP (5,5)) se mostraram superiores, sob o ponto de vista de desempenho, quando comparadas ao material puramente granular, no formato semirrígido invertido.

Para as configurações de pavimento semirrígido com incorporação dos materiais cimentados como camadas de base, obteve-se sucesso, em comparação aos dimensionamentos de referência, apenas no uso das misturas SJ (5,5) e DP (5,5) para atendimento das condições de Tráfego 2. Para o dimensionamento de referência realizado para as condições de Tráfego 1, todas as misturas estabilizadas com cimento exibiram trincamento precoce.

Constata-se assim, nos cenários estudados por este trabalho, que misturas cimentadas com maior teor de cimento são efetivas tanto para uso em base quanto em sub-base de pavimentos rodoviários, desde que as camadas estruturais dos materiais estabilizados não sejam destacadamente delgadas. Há de se ressaltar, todavia, que não foi realizada uma análise econômica neste estudo. A inclusão

de um estudo de custo-benefício, com uma análise econômica e modelagem detalhada do impacto financeiro destas sugestões é fundamental para decisão de substituição das camadas puramente granulares por materiais estabilizados quimicamente. Esta ação está em desenvolvimento e será publicada em desdobramentos futuros dos trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa envolvido neste artigo.

Ainda, destaca-se também que o programa MeDiNa não incorpora o processo de reflexão de trincas a sua sistemática de avaliação, devendo o projetista atribuir medidas para mitigar esta ação.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

AHB: Análise formal, Conceitualização, Curadoria de dados, Escrita — rascunho original, Escrita — revisão e edição, Investigação, Metodologia, Visualização; LDB: Análise formal, Escrita — revisão e edição, Metodologia, Visualização; RJB: Administração de projetos, Aquisição de financiamento, Conceitualização, Metodologia, Recursos, Supervisão, Validação; TCC: Administração de projetos, Aquisição de financiamento, Conceitualização, Metodologia, Recursos, Supervisão, Validação.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram que não há conflito de interesses.

USO DE TECNOLOGIA ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que nenhuma ferramenta de inteligência artificial foi usada na pesquisa aqui relatada ou na preparação deste artigo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Rede de Tecnologia em Asfalto ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis/PETROBRAS, Brasil.

REFERÊNCIAS

- AASHTO (2014) Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis. Washington: AASHTO.
- ABNT (2010) NBR 12142/2010: Concreto – Determinação da Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2013a) NBR 11803/2013: Materiais para Base ou Sub-Base de Brita Graduada Tratada com Cimento — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2013b) NBR 12261/2013: Dosagem de Brita Graduada Tratada com Cimento – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2018) NBR 5739/2018: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT (2020) NBR 7182/2020: Solos – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT.
- Albuquerque, F.S. and R. DA S. Nascimento (2018) Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE, TRANSPORTES, v. 26, n. 1, p. 157-71. <http://doi.org/10.14295/transportes.v26i1.1358>.
- Andrade, L.R.; A.K. Kuschiishi; I.S. Bessa et al. (2015) Comportamento mecânico de camadas de bases granular e tratada com cimento em rodovia de tráfego muito pesado. Anais do XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Ouro Preto: ANPET, p. 148-159.
- Aranha, A.L. (2013) Avaliação Laboratorial e de Campo da Tecnologia de Reciclagem de Base com Cimento para a Reabilitação de Pavimentos. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/D.3.2012.tde-26072013-114250.
- Arteris (2015) Especificação Particular para Execução de Brita Graduada Tratada com Cimento – BGTC. Centro De Desenvolvimento Tecnológico Designação - CDT - Arteris Es 009 - Rev 08, 2015. São Paulo: Arteris.
- Austroroads (2008) The Development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterization of Cemented Materials: Technical Report. Published by Austroroads Incorporated. Austroroads Publication No. AP-T101/08. Sydney: Austroroads.
- Austroroads (2014) Cemented Materials Characterization: Final Report. Austroroads Technical Report, Published by Austroroads Incorporated. Publication No. AP-R462-14. ISBN 978-1-925037-72-2. Sydney: Austroroads.

- Back, A.H. (2018) Avaliação das Propriedades Químicas e Geomecânicas de Agregados Oriundos de Jazidas de Rochas de Diferentes Litologias do Estado do RS. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/14059>> (acesso em 15/01/2025).
- Back, A.H. (2022) Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Cimentadas do tipo BGTC Utilizando Duas Rochas Extrusivas Representativas do Estado do RS. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/24417>> (acesso em 15/01/2025).
- Balbo, J.T. (1993) Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/T.3.1993.tde-23072024-100058.
- Balbo, J.T. (2006) Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura, Revista Transporte, v. 14, n. 1, p. 45-53. DOI: [10.14295/transportes.v14i1.59](https://doi.org/10.14295/transportes.v14i1.59).
- Balbo, J.T. (2007) Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração. São Paulo: Oficina de Textos.
- Boissoudy, A.B. and R. Kobisch (1979) Comportement mécanique de structures en graves-ciment, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, v. 99, p. 2297.
- Brasil (2023) Manual de ajuda programa MeDiNa - versão 1.1.9. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-versao-1-1-9>> (acesso em 07/2024).
- Bueno, L.D. (2016) Avaliação Deflectométrica e de Rigidez: Estudo de Caso em Três Trechos Monitorados em Santa Maria/RS. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7926>> (acesso em 15/01/2025).
- Bueno, L.D. (2019) Contribuição para a Previsão Empírico-Mecanicista da Irregularidade Longitudinal e seus Desdobramentos Econômicos em Pavimentos Asfálticos. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/19395>> (acesso em 15/01/2025).
- Ceratti, J.A.P. (1991) Estudo do Comportamento à Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/es/teses-de-doutorado/135-1991/752-jorge-augusto-pereira-ceratti>> (acesso em 15/01/2025).
- Ceratti, J.A.P.; L.B. Bernucci and J.B. Soares (2015) Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação. Rio de Janeiro: ABEDA.
- Custodio, D.A.S. (2022) Caracterização à Fadiga de Misturas Asfálticas por Compressão Diametral e Comparação com os Resultados do Ensaio de Tração-Compressão. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/25760>> (acesso em 15/01/2025).
- Dac Chi, N. (1978) Les graves traitées au ciment: leurs principales caractéristiques, leur comportement à la fatigue, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, v. 94, p. 94.
- Dac Chi, N. (1981) Etude du comportement en fatigue des matériaux traités aux liants hydrauliques pour assises de chaussées, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, v. 115, p. 33-48.
- Dac Chi, N. and J. Mulders (1984) Comportement en fatigue des sols fins traités à la chaux et au ciment, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, v. 133, p. 2940.
- DAER (1991) DAER-ES 11/91: Especificações Gerais Pavimentação - Base Tratada com Cimento. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. Porto Alegre: DAER.
- DMRB (2006) Design Manual for Roads and Bridges, Volume 7: Pavement Design and Maintenance, Section 2: Pavement Design and Construction, Part 3, HD 26/06, Pavement Design. Birmingham: DMRB.
- DNIT (2013) DNIT-ME 164/2013: Solos - Compactação Utilizando Amostras Não Trabalhadas - Método de Ensaio. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2018a) DNIT-ME 135/2018: Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2018b) DNIT-ME 136/2018: Pavimentação Asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2018c) DNIT-ME 181/2018: Pavimentação - Material estabilizado quimicamente - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio (versão corrigida em 20/04/2023). Rio de Janeiro: DNIT.
- DNIT (2021a) DNIT-ME 434/2021: Pavimentação - Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada em Camadas Estabilizadas Quimicamente - Método de Ensaio. Brasília: DNIT.
- DNIT (2021b) IS-247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação Usando o Método de Dimensionamento Nacional - Medina. Brasília: DNIT.
- DNPM (2015) Cadastro Nacional de Produtores de Brita. Brasília, DF: DNPM.
- Fernandes Jr., J.L. (1994) Investigação dos Efeitos das Solicitações de Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-09042018-102257/pt-br.php>> (acesso em 15/01/2025).
- Flintsch, G.W.; B.K. Diefenderfer and O. Nunez (2008) Composite Pavement Systems: Synthesis of Design and Construction Practices: Report N°. FHWA/VTRC 09-CR2. 60p. Washington, EUA: FHWA.
- Holz, M. and L.F. Ros (2000) Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Centro de Investigação do Gondwana / UFRGS. 444 p.

- LCPC (1994) *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée*. Paris, França: LCPC.
- Lv, S.; C. Xia; H. Liu et al. (2019) Strength and fatigue performance for cement-treated aggregate base materials, *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, n. 6, p. 690-699. DOI: 10.1080/10298436.2019.1634808.
- Mandal, T. (2012) *Fatigue Behavior and Modulus Growth of Cementitiously Stabilized Pavement Layers*. Thesis (Master). University of Wisconsin-Madison, Madison. Disponível em: <<http://digital.library.wisc.edu/1793/66326>> (acesso em 15/01/2025).
- Merrill, D.; A.V. Dommelen and L. Gaspar (2006) A review of practical experience throughout Europe on deterioration in fully-flexible and semi-rigid long-life pavements, *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 7, n. 2, p. 101-9. DOI: 10.1080/10298430600619117.
- Midgley, L. and R. Yeo (2008) *The development and evaluation of protocols for the laboratory characterisation of cemented materials*. Sydney, Austrália: Austroads Technical Report.
- Paiva, P.S. (2017) *Caracterização e Avaliação das Propriedades Geomecânicas para Uso em Pavimentação de Agregados de Rochas Vulcânicas da Porção Central do Rio Grande do Sul*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/14728>> (acesso em 15/01/2025).
- Pascoal, P.T. (2024) *Deformabilidade de Subleitos de Trechos Monitorados da BR116/RS Considerando Variações de Umidade em Laboratório e Campo*. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria, UFSM. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/32567>> (acesso em 15/01/2025).
- Prado, K. (2018) *Estudo de Critérios de Dosagem para Melhoria de Desempenho Mecânico de Brita Graduada Tratada com Cimento*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE.
- Prado, K.; F.S. Albuquerque and G.B.O. Almeida (2020) Influence of granulometry, cement content, and moisture in the mechanical performance of the cemented crushed stone, *Revista Transportes*, v. 28, n. 1, p. 81-98. DOI: [10.14295/transportes.v28i1.1861](https://doi.org/10.14295/transportes.v28i1.1861).
- Ribas, J. (2014) *Parâmetros Elásticos Típicos de Materiais de Pavimentos Flexíveis do Rio Grande do Sul e sua Aplicação em uma Análise de Custo/Benefício*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7868>> (acesso em 15/01/2025).
- Rodrigues, M.S. (2018) *Determinação de Parâmetros que Influenciam nas Propriedades Mecânicas de Material Fresado Estabilizado Granulometricamente e Quimicamente para Emprego em Camadas de Pavimentos*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/15963>> (acesso em 15/01/2025).
- Santos, M.S. (2015) *Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria – RS*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7886>> (acesso em 15/01/2025).
- Sagrilo, A.V. (2020) *Estudo de Deformabilidade e Empacotamento de Britas com Diferentes Origens Litológicas do Estado do Rio Grande do Sul*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/22211>> (acesso em 15/01/2025).
- Sagrilo, A.V. (2024) *Britas graduadas Simples: Influência da Litologia, Estrutura Interna e Umidade na Deformabilidade*. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/31905>> (acesso em 15/01/2025).
- SAPEM (2014). *South African Pavement Engineering Manual*. 2nd ed. Pretoria, Africa do Sul: The South African National Roads Agency Soc. Ltd.
- Sountharajah, A.; H.H. Bui; N. Nguyen et al. (2018) Early-age fatigue damage assessment of cement-treated bases under repetitive heavy traffic loading, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 6, p. 04018079. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002250.
- Theyse, H.; M. De Beer and F. Rust (1996) Overview of South African mechanistic pavement design method, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1539, n. 1, p. 6-17. DOI: 10.1177/0361198196153900102.
- Trichês, G. (1993) *Concreto Compactado a Rolo para Aplicação em Pavimentação: Estudo do Comportamento na Fadiga e Proposição de Metodologia de Dimensionamento*. Tese (Doutorado). Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos. Disponível em: <<http://www.bdita.bibl.ita.br/>> (acesso em 15/01/2025).
- White, G.W. and C.T. Gnanendran (2005) The influence of compaction method and density on the strength and modulus of cementitiously stabilised pavement materials, *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 6, n. 2, p. 97-110. DOI: 10.1080/10298430500089593.
- Xuan, D.X.; L.J.M. Houben; A.A.A. Molenaar et al. (2012) Mechanical properties of cement-treated aggregate material – a review. *Materials & Design*, v. 33, p. 496-502. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.04.055.
- Yeo, Y.S. (2011) *Characterisation of Cement Treated Crushed Rock Basecourse for Western Australian Roads*. Thesis (Doctor) Curtin University, School of Civil and Mechanical Engineering, Perth, Austrália. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/20.500.11937/2277>> (acesso em 15/01/2025).
- Yeo, Y.S.; P. Jitsangiam and H. Nikraz (2011) Mix design of cementitious basecourse. In *International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011)*. Perth, Austrália: ICAGE, p. 379-385.