



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ NA TRAÇÃO A PARTIR DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BGTC

Verônica Janaína Melo Barreto Nunes¹; Fernando Silva Albuquerque²

RESUMO

O avanço dos estudos sobre as propriedades mecânicas do concreto de cimento Portland tem permitido uma compreensão mais aprofundada de seu desempenho em serviço, mesmo sem que todas as suas propriedades tenham sido determinadas experimentalmente. Algumas dessas relações podem ser observadas em normas técnicas, a exemplo da norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014). Este estudo realizou ensaios mecânicos em misturas de brita graduada tratada com cimento (BGTC), utilizando dois tipos de cimento Portland (CP II-F 32 e CP IV 32 RS), em dois teores do ligante hidráulico (3% e 5%) e duas idades (7 e 28 dias). O objetivo foi estabelecer relações entre a resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral com os resultados de ensaios de flexão (resistência à tração na flexão e módulo flexural) para BGTC, e analisar a influência do tipo de cimento, teor de ligante e tempo de cura nessas relações. As relações estabelecidas visam possibilitar a utilização de variáveis mais facilmente obtidas na previsão de parâmetros mecânicos, que de outra forma demandariam mais tempo, material e tecnologia. Essa abordagem permite não só prever o comportamento mecânico da mistura cimentada, mas também desenvolver um anteprojeto eficiente, com boa precisão em relação ao projeto executivo, momento em que os ensaios mais complexos seriam executados.

PALAVRAS-CHAVE: BGTC, cimentados, ensaios, compressão, flexão.

ABSTRACT

The advancement in studies regarding the mechanical properties of Portland cement concrete has enabled a deeper understanding of its performance in service, even without all its properties being experimentally determined. Some of these relationships can be observed in technical standards, such as the Brazilian standard NBR 6118 (ABNT, 2014). This study conducted mechanical tests on mixes of cement-treated crushed stones (CTCS), using two types of Portland cement (CP II-F 32 and CP IV 32 RS), at two binder contents (3% and 5%) and two ages (7 and 28 days). The objective was to establish relationships between simple compressive strength and splitting tensile strength with the results of flexural tests (flexural tensile strength and flexural modulus) for CTCS, and to analyze the influence of cement type, binder content, and curing time on these relationships. This aims to enable the use of more easily obtainable variables in predicting mechanical parameters, which would otherwise require more time, material, and technology. This approach not only allows predicting the mechanical behavior of the cementitious mixture but also developing an efficient preliminary design with good accuracy compared to the executive design, moment in which the more complex tests would be conducted.

KEY WORDS: CTCS, cemented, tests, compression, flexure.

¹ Universidade Federal de Sergipe, janaina.melo.eng@gmail.com; albuquerque.f.s@academico.ufs.br.



CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para Albuquerque e Mendonça (2017), em locais com grandes volumes de tráfego, as bases ou sub-bases estabilizadas quimicamente com cimento Portland podem ser adotadas como uma solução estrutural para os pavimentos, a fim de melhorar seu desempenho e reduzir os investimentos financeiros em longo prazo, desde que o comportamento mecânico desses materiais seja conhecido e respeitado.

Nesse contexto, destaca-se a utilização da brita graduada tratada com cimento (BGTC), camada de base ou sub-base composta por mistura, em usina, de produtos de britagem, cimento e água, adequadamente compactada e submetida a processo eficiente de cura (DER/PR, 2018).

Com relação ao comportamento mecânico da BGTC, alguns parâmetros podem ser determinados para caracterizar a mistura cimentada, quais sejam: resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo dinâmico, módulo flexural, tenacidade e resistência à fadiga.

Apesar de isoladamente cada um desses parâmetros indicar uma tendência de desempenho do material frente a um carregamento específico, a relação entre as variáveis mecânicas pode auxiliar de maneira mais eficaz a escolha da melhor solução estrutural para um dado projeto, além de fornecer expressões a partir das quais se obtenham parâmetros que são determinados por ensaios mais complexos (que demandem mais tempo, maior quantidade de material ou tecnologia mais avançada) em função dos ensaios de simples execução, viabilizando o desenvolvimento de um anteprojeto com aproximação razoável do projeto executivo.

Conforme explicam Bernucci *et al.* (2006), em estruturas de pavimentos é esperado que as misturas apresentem baixa rigidez, para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro. Por outro lado, espera-se também alta resistência à tração, pois a maior resistência na ruptura, de modo geral, é também associada a uma maior resistência à fadiga. Assim, a razão entre parâmetros de rigidez e resistência podem auxiliar na previsão do desempenho de camadas dos pavimentos.

A resistência à compressão é usualmente reconhecida como um importante indicador da qualidade da mistura de brita graduada tratada com cimento (XUAN *et al.*, 2012), conforme observado em normatizações nacionais a exemplo da NBR 11803 (ABNT, 2013) e das especificações técnicas ET-DE-P00/009 (DER/SP, 2005) e ES-P 16/18 (DER/PR, 2018), ou mesmo em referências estrangeiras, a citar as orientações do Manual de Pavimentação da África do Sul (SAPEM, 2014). Os avanços dos estudos sobre o concreto de cimento Portland possibilitaram estabelecer relações que envolvem a resistência à compressão simples (RCS) e as demais propriedades do concreto, como as expressões da NBR 6118 (ABNT 2014), que relacionam tal parâmetro com a resistência à tração e módulo de elasticidade. Nesse sentido, uma avaliação dos resultados de ensaios mecânicos realizados com BGTC poderiam indicar relações entre as propriedades mecânicas da mistura, a fim de apontar variáveis mecânicas que contribuíssem para a compreensão do comportamento do material e no desenvolvimento de um anteprojeto.

Desse modo, o presente artigo procura estabelecer relações entre resultados de ensaios de resistência realizados com carregamento na compressão e ensaios de rigidez e resistência na flexão para a BGTC, além de analisar a influência do tipo de cimento (CP II-F 32 e CPIV 32 RS), teor do ligante hidráulico (3% e 5%) e tempo de cura (7 e 28 dias) nas expressões obtidas.



PARÂMETROS MECÂNICOS

Resistência à Compressão Simples

A determinação da resistência à compressão consiste na aplicação de um carregamento crescente de compressão axial, sem tensão de confinamento, em corpos de prova cilíndricos, preferencialmente com altura de, pelo menos, duas vezes seu diâmetro (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Pesquisas já conduzidas sobre o tema indicam que a resistência à compressão da BGTC é influenciada por fatores como o teor de cimento, tipo de agregado e sua granulometria, energia e mecanismos de compactação, umidade da mistura e condição de cura (WU, 2011; YEO; JITSANGIAM; NIKRAZ, 2011; XUAN *et al.*, 2012; KLINSKY; FARIA, 2015; KLINSKY; BARDINI; FARIA, 2018; PRADO, 2018).

O cimento utilizado na BGTC desempenha um papel importante para melhorar a coesão da mistura e suas propriedades mecânicas. A resistência aumenta à medida que o teor de cimento aumenta, porque os produtos de hidratação preenchem os poros da matriz e aumentam a resistência da ligação entre as partículas (WU, 2011).

Resistência à tração

Segundo Yeo; Jitsangiam e Nikraz (2011), as reações de hidratação do cimento na BGTC formam uma matriz de intertravamento que liga os agregados e confere uma resistência à tração ao material, que por sua vez promove maior rigidez à flexão aos pavimentos, minimizando a deformação permanente.

A resistência à tração da brita graduada tratada com cimento é sempre considerada como um parâmetro significativo para o projeto de pavimentação, pois, enquanto camada da estrutura do pavimento, a fibra inferior do material sofre tensão de tração (XUAN *et al.*, 2012). Essa propriedade mecânica da BGTC é usualmente obtida por meio de ensaios de tração indireta e ensaios de tração na flexão, embora também seja possível sua obtenção por meio de ensaios de tração direta.

A obtenção da resistência à tração por meio do ensaio de tração indireta, ou tração por compressão diametral, consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um corpo de prova cilíndrico, que geram tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro solicitado.

Fratura e falha da camada de base de agregado estabilizado com cimento são causadas principalmente pela tensão de tração na flexão e deformação de tração produzida na fibra inferior da camada (MANDAL; EDIL; TIMJUM, 2017). A BGTC trabalhando em flexão será responsável pela absorção de tensões horizontais de tração, o que implica na necessidade de conhecer o nível máximo de solicitação à tração, a fim de definir o carregamento máximo que leva à ruptura das ligações resultantes das reações de hidratação do cimento. No ensaio mais comumente realizado para determinar a resistência à tração na flexão, são utilizados corpos de prova prismáticos, nos quais são aplicadas duas cargas sobre os terços do vão de apoio da amostra.



Rigidez

A rigidez da brita graduada tratada com cimento pode ser investigada por meio de parâmetros como módulo de elasticidade, módulo dinâmico, módulo flexural e módulo de resiliência.

O conhecimento do módulo de elasticidade é fundamental na análise das deformações e trincamentos nas bases cimentadas, uma vez que as estruturas são projetadas de modo que não ultrapassem os valores de tensão e deformação correspondentes ao trecho linear do diagrama de deformação elástica (NASCIMENTO, 2017).

O módulo dinâmico da mistura cimentada pode ser obtido através de frequências ressonantes transversal, longitudinal e torcional de prismas e cilindros de concreto, através dos métodos de ressonância forçada e de impacto. El-Newihy (2013) explica que a vantagem de usar o módulo dinâmico para monitorar as propriedades de um material cimentado é que ele é sensível a mudanças dentro do compósito, como fissuras, adições minerais e porosidade, que fornecem propriedades cruciais para desempenho do material em serviço. Esse parâmetro de rigidez é especialmente relevante para análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura (ALMEIDA, 2005).

Como parâmetro de rigidez da BGTC tem-se, ainda, o módulo de resiliência e o módulo flexural. O módulo de resiliência do material representa sua resposta elástica resultante de uma carga aplicada em pulsos de curta duração (DNIT, 2018b). Quanto ao módulo flexural de misturas cimentadas, algumas interpretações sobre a intensidade do módulo flexural são abordadas por Mandal; Edil e Timjum (2017), os quais relatam que baixo módulo flexural em materiais estabilizados com cimento pode levar a altos níveis de tensão de tração na fibra inferior da camada de superfície e, conseqüentemente, trincamento por fadiga. Por outro lado, pavimentos com revestimento asfáltico e base muito rígida, módulo flexural elevado, estão sujeitos a fissuras de cima para baixo. Além disso, alto valor de módulo flexural em decorrência de elevado teor de ligante hidráulico, como o cimento, pode causar altas taxas de retração e grandes tensões de tração nesse material.

No presente artigo, a rigidez das misturas será analisada em função do módulo flexural, em consonância com o objetivo de relacionar ensaios de resistência com carregamento na compressão e os ensaios rigidez e resistência no carregamento na flexão, já que esse último tipo de carregamento se aproxima mais às condições em campo para materiais empregados em pavimentação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

As misturas de BGTC analisadas nessa pesquisa foram constituídas por agregados, cimento e água. Foram utilizados agregados de origem gnáissica, coletados em uma pedreira localizada no povoado Cajaíba, no município de Itabaiana, em Sergipe, além de areia fina, obtida no comércio local. Os agregados foram caracterizados com base na composição granulométrica (Figura 1), segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003), e os agregados graúdos quanto ao índice de forma, absorção e massa específica (Tabela 1), seguindo as especificações da NBR 7809 (ABNT, 2019) e DNER-ME 195 (DNIT, 1997), respectivamente.

Nas misturas, foram utilizados dois tipos de cimento: CP II-F 32, ou seja, cimento Portland composto com material carbonático e classe de resistência de 32 MPa, e o CP IV 32 RS, isto é, cimento Portland pozolânico resistente a sulfato, com classe de resistência de 32 MPa. O CP II-F-



32 possui em sua composição 75% a 89% de clínquer mais sulfatos de cálcio e 11% a 25% de material carbonático, enquanto o CP IV 32 RS possui 45% a 85% de clínquer mais sulfatos de cálcio, 15% a 50% de material pozzolânico e 0% a 10% de material carbonático (ABNT, 2018b). A água potável usada estava livre de materiais orgânicos, óleos ou outras substâncias prejudiciais à hidratação do cimento.

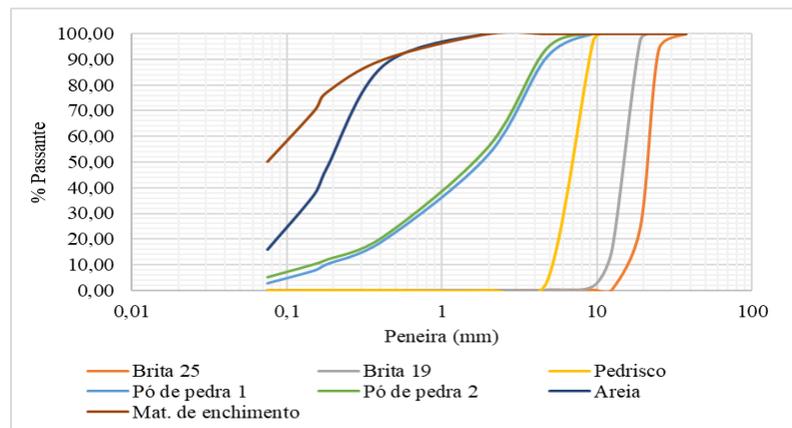


Figura 1. Curva granulométrica dos agregados

Tabela 1. Caracterização do agregado graúdo

Agregados	Absorção (%)	Massa específica seca (g/cm ³)	Índice de forma
Brita 25	0,26	2,697	2,01
Brita 19	0,29	2,700	2,28
Pedrisco	0,55	2,697	

Dosagem

A dosagem da BGTC consiste na determinação da composição granulométrica, teor de cimento e umidade da mistura.

Tendo em vista os resultados e conclusões apresentados por Prado (2018), empregou-se a faixa granulométrica estabelecida pelo Manual de Engenharia de Pavimentos da África do Sul (SAPEM, 2014), sendo, portanto, necessária a utilização de seis tipos de agregados, distribuídos da seguinte forma: 11,0% de brita 25; 15,0% de brita 19; 19,0% de pedrisco; 38,5% de pó de pedra; 12,5% de areia; e 4,0% de material de enchimento.

A curva granulométrica indica a proporção de cada agregado utilizado na mistura, porém, esse percentual foi ajustado em função do teor de cimento adicionado, ou seja, houve uma substituição em percentual de massa para inclusão do cimento, conforme Equação 1. Na pesquisa, foram utilizados dois teores de cimento, 3% e 5%, para cada tipo de cimento, totalizando, portanto, quatro dosagens (tratamentos) possíveis.

$$m\% = m^* \times (100\% - \text{cim}\%) \quad (1)$$

onde: m% = percentual em massa do agregado “m” na mistura com cimento (%);

m* = proporção em massa do agregado sem o cimento (decimal);

cim% = percentual de cimento que se deseja adicionar (%).



Para determinar a umidade ótima das misturas, foi realizado o ensaio de compactação na energia Proctor modificada, conforme metodologia apresentada em DNIT 164-ME (DNIT, 2013), obtendo-se uma massa específica seca máxima de $2,417 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima igual a 5,2% para um teor de 3,0% de cimento. Já para 5,0% de cimento, foram encontradas massa específica seca máxima e umidade ótima correspondentes a $2,317 \text{ g/cm}^3$ e 5,8%, respectivamente.

As moldagens foram realizadas com mecanismos de compactação e em moldes específicos para cada ensaio. Concluída a moldagem, o conjunto (molde e material compactado) foi embalado em filme de policloreto de vinil (PVC), para conservar a umidade, e levado à câmara úmida com temperatura e umidade relativa do ar controladas em $30 \pm 2^\circ\text{C}$ e 85%, respectivamente, onde permaneceu por um período de 24 horas. Decorrido esse tempo, o corpo de prova foi desmoldado e novamente embalado em filme de PVC. Então, a amostra retornou à câmara úmida para conclusão do período de cura (sete ou vinte e oito dias), quando foram realizados os ensaios propostos.

Ensaio Mecânicos

As propriedades mecânicas foram avaliadas aos sete e vinte e oito dias de cura a partir do ensaio de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD), resistência à tração na flexão (RTF) e módulo flexural (MF). A Figura 2 ilustra os ensaios mecânicos realizados.

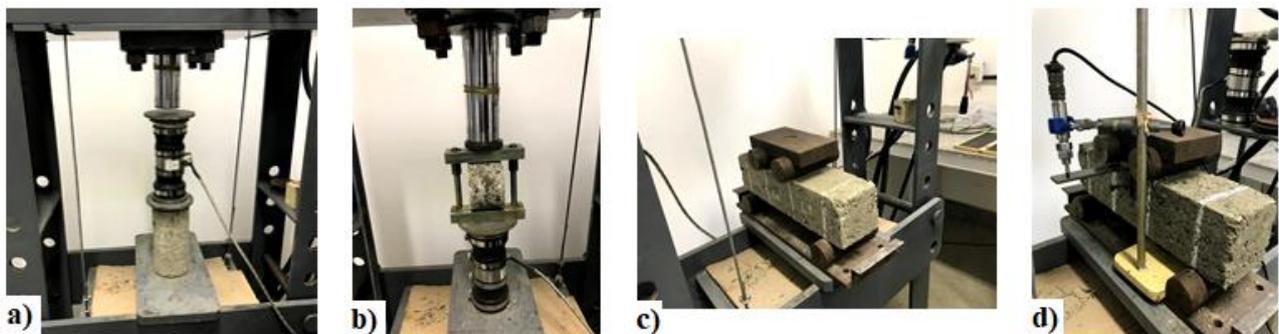


Figura 2. Configuração dos ensaios mecânicos: a) RCS; b) RTCD; c) RTF; d) MF

Utilizando a metodologia de moldagem da norma DNIT 181-ME (DNIT, 2018b), que apresenta as condições de compactação de misturas de BGTC em corpo de prova cilíndricos, foram moldados os corpos de prova para a determinação da resistência à compressão simples. Assim, foram compactados corpos de prova em cilindros com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, em 10 camadas iguais, com aplicação de 21 golpes por camada, através de um soquete com 4,53kgf, caindo a 45,70 cm, garantindo uma compactação mínima de 100%. O controle do grau de compactação foi realizado a partir da relação entre o peso específico aparente seco máximo da amostra compactada e o peso específico aparente seco máximo determinado no ensaio de compactação para o teor de cimento analisado.

Na determinação da resistência à tração por compressão diametral, os corpos de prova foram moldados em cilindros com 10 cm de diâmetro e 6 cm de altura, sendo aplicados 62 golpes em camada única, por meio de um soquete com massa de 4.540 g e altura de queda livre de 45,72 cm.

A resistência à tração na flexão e o módulo flexural foram determinados utilizando corpos de prova prismáticos, confeccionados em moldes com dimensões $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$. A compactação foi realizada por amassamento, prensagem estática, em três camadas com igual quantidade de material.



As camadas foram prensadas com uma força de compressão variável e crescente até que fosse atingida a altura pretendida para cada camada.

Confeccionados os corpos de prova, os ensaios foram realizados conforme normatizações a seguir:

- Determinação da resistência à compressão simples, determinada segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018a), com moldagem do corpo de prova conforme a norma DNIT 181-ME (DNIT, 2018b);
- Determinação da resistência à tração por compressão diametral, com os procedimentos apresentados pela norma DNIT 136-ME (DNIT, 2018a);
- Determinação da resistência à tração na flexão, utilizando os métodos de ensaios descritos em C78/78M (ASTM, 2021), AP-R462 (AUSTROADS, 2014), Report 789 (NCHRP, 2014) e NBR 12142 (ABNT, 2010);
- Determinação do módulo flexural, com base nos procedimentos descritos no Report 789 (NCHRP, 2014) e AP-R462 (AUSTROADS, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para análise das correlações entre as propriedades mecânicas da BGTC foram utilizados os resultados de resistência e rigidez apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de rigidez e resistência de BGTC

Teor de cimento (%)	Idade (dias)	tipo de cimento	RCS (MPa)	RTCD (MPa)	RTF (MPa)	MF (MPa)
3	7	CP II-F 32	4,73	0,44	0,33	239,65
5	7	CP II-F 32	8,21	1,01	0,99	573,93
3	7	CP IV 32 RS	5,18	0,61	0,52	688,62
5	7	CP IV 32 RS	10,19	1,22	1,47	1428,66
3	28	CP II-F 32	4,63	0,68	0,77	358,06
5	28	CP II-F 32	8,36	1,40	1,51	756,29
3	28	CP IV 32 RS	7,92	0,96	1,13	687,66
5	28	CP IV 32 RS	13,22	2,08	2,31	1485,18

Com base na Tabela 2, percebe-se que a utilização do CP IV 32 RS nas misturas foi responsável pelo aumento de todos os parâmetros investigados, em comparação às misturas com CP-II F 32 com o mesmo teor de cimento e tempo de cura (idade). Constata-se também que maior teor de cimento e tempo de cura estão associados a maiores resistências e rigidezes. Assim, esses três fatores (tipo de cimento, teor do ligante hidráulico e idade) serão analisados nas relações estabelecidas entre as propriedades mecânicas.

A relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples é observada na Figura 3a, que apresenta todos os pares de RCS e RTCD obtidos. Dentre os fatores analisados, o tempo de cura foi o fator que demonstrou maior influência na relação, obtendo-se um fator de determinação (R^2) igual a 0,9806 para os resultados aos 7 dias de cura e 0,9348 para 28 dias (Figura 3b). Quanto mais próximo de 1 é o R^2 melhor é o ajuste dos dados ao modelo proposto.

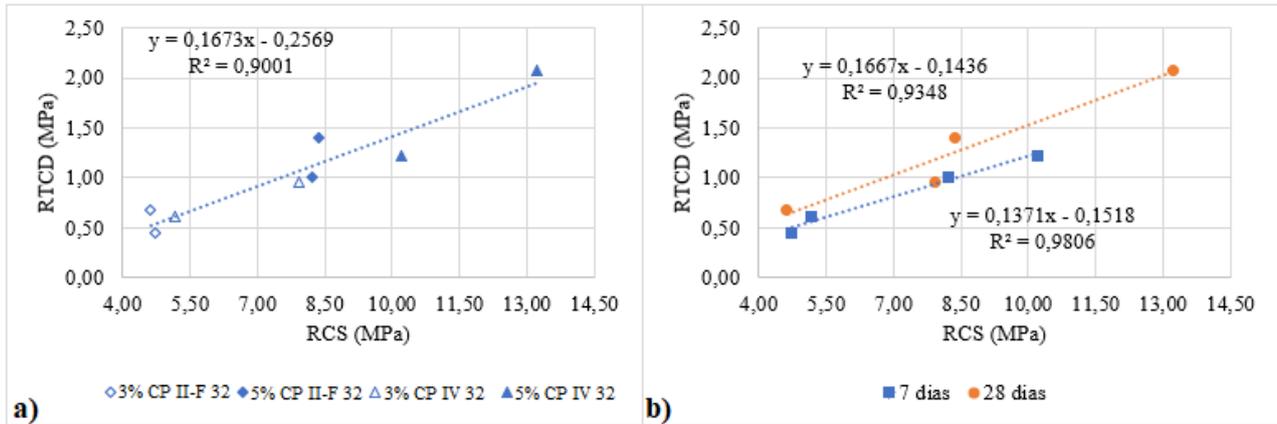


Figura 3. a) Gráfico RCS x RTCD para todos os pares; b) Gráfico RCS x RTCD agrupados em função do tempo de cura. A Tabela 3 apresenta as expressões e R^2 encontrados na análise dos demais fatores.

Tabela 3. Relação entre RCS e RTCD

Fator do grupo	Expressão	R^2
3% de cimento	$RTCD = 0,1218 RCS - 0,0126$	0,7703
5% de cimento	$RTCD = 0,1753 RCS - 0,3253$	0,7773
CP II-F 32	$RTCD = 0,1794 RCS - 0,2814$	0,8094
CP IV 32 RS	$RTCD = 0,1792 RCS - 0,4194$	0,9464

A RCS também foi relacionada à RTF (Figura 4 e Tabela 4). Percebe-se que o tempo de cura também corresponde ao fator de maior influência na relação entre esses parâmetros mecânicos, com R^2 igual a 0,9878 para os ensaios aos 7 dias de cura e 0,9604 para 28 dias. Constatou-se, ainda, que para as misturas com cimento tipo CP IV 32 RS as relações lineares entre RCS x RTCD e RCS x RTF apresentam um bom ajuste com os resultados obtidos.

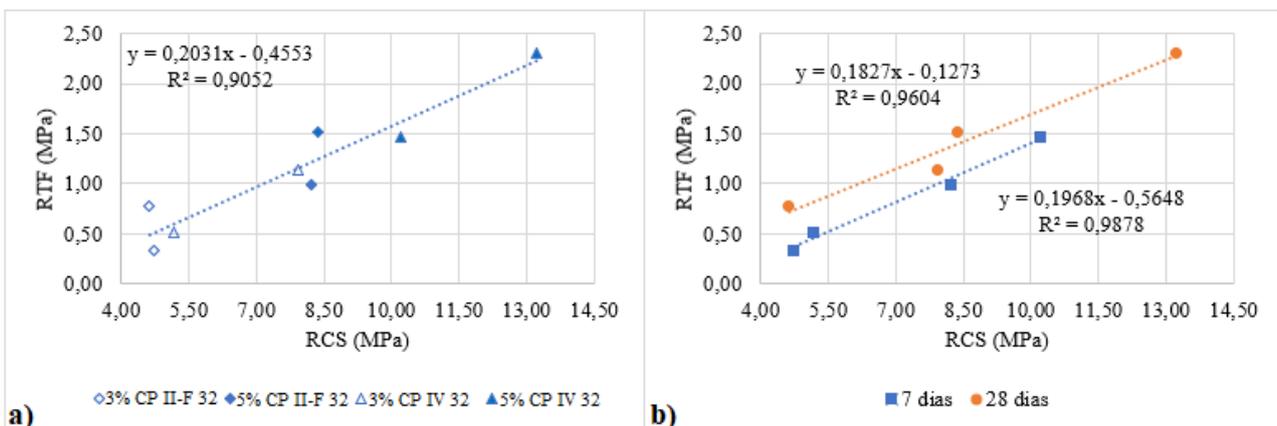


Figura 4. a) Gráfico RCS x RTF para todos os pares; b) Gráfico RCS x RTF agrupados em função do tempo de cura.

Tabela 4. Relação entre RCS e RTF

Fator do grupo	Expressão	R^2
3% de cimento	$RTF = 0,1835 RCS - 0,3434$	0,6772
5% de cimento	$RTF = 0,2139 RCS - 0,5659$	0,8355
CP II-F 32	$RTF = 0,196 RCS - 0,3688$	0,6877
CP IV 32 RS	$RTF = 0,218 RCS - 0,6322$	0,9887



Foi investigada a relação entre a RTCD x RTF, obtendo-se bons ajustes para todos os fatores de influência avaliados nessa pesquisa, apesar do melhor ajuste ser obtido ao separar os resultados em função do tempo de cura, conforme pode ser visualizado na Tabela 5 e Figura 5.

Quando comparado ao ensaio de resistência à tração na flexão, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral demanda menos tempo e material, consequentemente é um ensaio de menor custo e mais prático à rotina de obras. São necessários 471,24 cm³ e 4000,00 cm³ da mistura de BGTC, para os ensaios de RTCD e RTF, respectivamente, além do método de compactação do CP prismático demandar um aparato mais sofisticado. Desse modo, o bom ajuste das expressões encontradas com os resultados experimentais para todos os fatores analisados indica a possibilidade de utilização do ensaio de RTCD na compreensão da capacidade resistiva à tração da BGTC.

Tabela 5. Relação entre RTCD e RTF

Fator do grupo	Expressão	R ²
7 dias de cura	$RTF = 1,4124 RTCD - 0,3287$	0,9763
28 dias de cura	$RTF = 1,0792 RTCD + 0,0512$	0,9965
3% de cimento	$RTF = 1,5858 RTCD - 0,3771$	0,9734
5% de cimento	$RTF = 1,1574 RTCD - 0,0787$	0,9665
CP II-F 32	$RTF = 1,1708 RTCD - 0,1306$	0,9761
CP IV 32 RS	$RTF = 1,177 RTCD - 0,0735$	0,9775

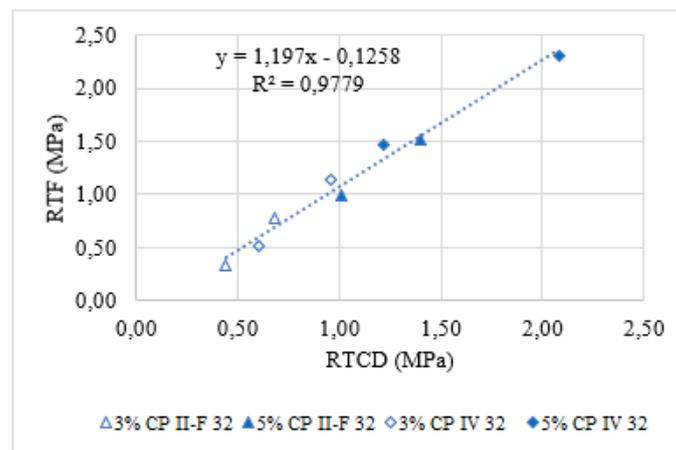


Figura 5. Gráfico RTCD x RTF para todos os pares obtidos

Também foram verificadas as relações existentes entre parâmetros de resistência e rigidez, através dos pares RCS x MF e RTCD x MF. Para a expressão obtida a partir dos pares RCS x MF foi encontrado um coeficiente de determinação igual a 0,806, com o melhor ajuste para os pares agrupados conforme o tempo de cura (Figura 6 e Tabela 6). Já para os pares RTCD x MF, percebe-se que o tipo de cimento apresentou grande influência na relação, sendo os resultados das misturas com cimento tipo CP II-F 32 os mais ajustados à expressão determinada pela tendência dos dados, embora o tempo de cura continue sendo um fator relevante, como observado na Figura 7 e Tabela 7.

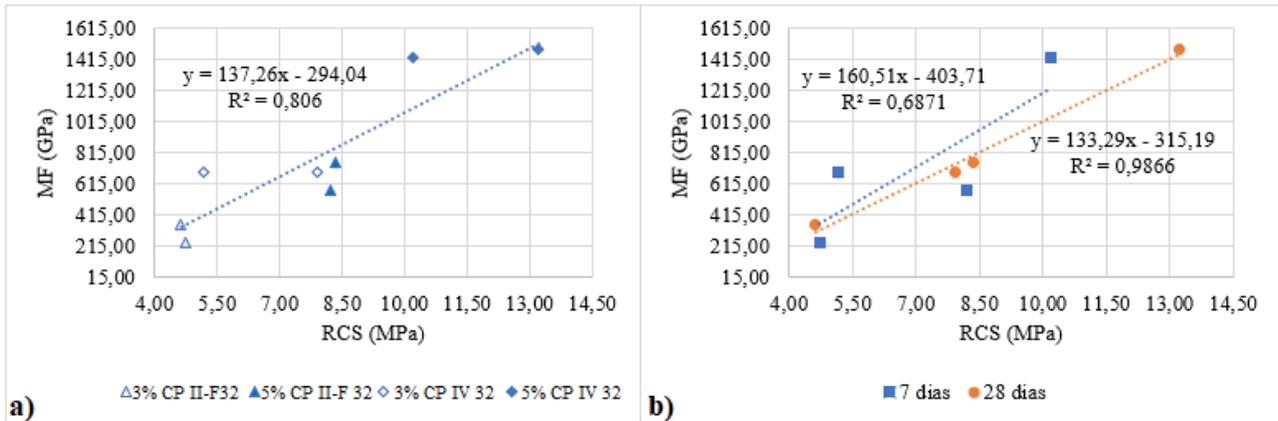


Figura 6. a) Gráfico RCS x MF para todos os pares; b) Gráfico RCS x MF agrupados em função do tempo de cura

Tabela 6. Relação entre RCS e MF

Fator do grupo	Expressão	R ²
3% de cimento	$MF = 99,516 \text{ RCS} - 65,158$	0,4518
5% de cimento	$MF = 172,3 \text{ RCS} - 661,32$	0,7499
CP II-F 32	$MF = 102,01 \text{ RCS} - 179,28$	0,8580
CP IV 32 RS	$MF = 115,94 \text{ RCS} + 14,285$	0,7926

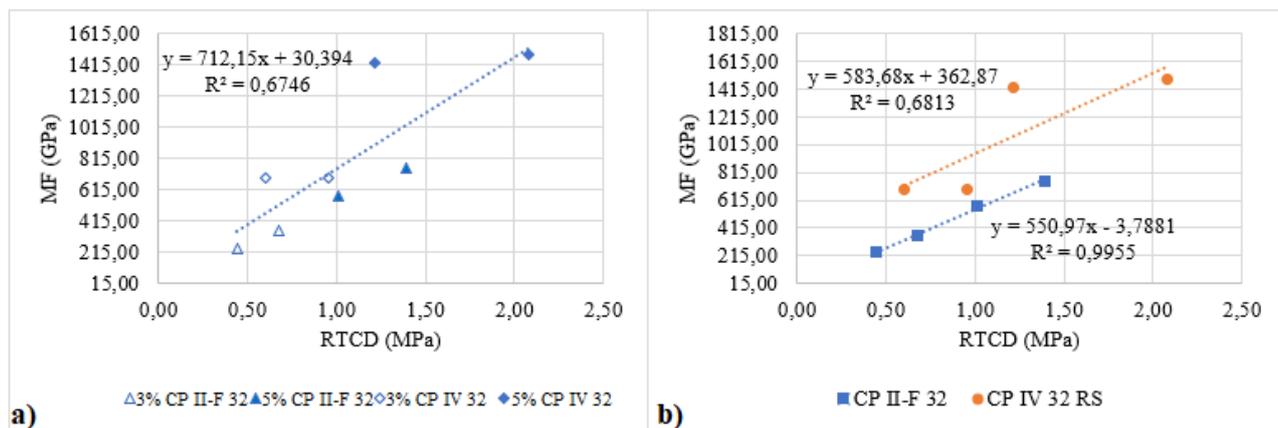


Figura 7. a) Gráfico RTCD x MF para todos os pares; b) Gráfico RTCD x MF agrupados em função do tipo de cimento

Tabela 7. Relação entre RTCD e MF

Fator do grupo	Expressão	R ²
3% de cimento	$MF = 720,86 \text{ RTCD} + 9,9216$	0,4562
5% de cimento	$MF = 641,6 \text{ RTCD} + 145,66$	0,4109
7 dias de cura	$MF = 1152,8 \text{ RTCD} - 211,6$	0,798
28 dias de cura	$MF = 755,43 \text{ RTCD} - 143,89$	0,942

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios aqui realizados em misturas de brita graduada tratada com cimento e as relações propostas a partir de parâmetros mecânicos, obtidos com carregamentos na compressão, indicaram a possibilidade de utilização de expressões para a estimativa de comportamento mecânico resultante de carregamento na flexão. Entretanto, cabe destacar que melhores ajustes para as relações



propostas foram obtidos quando se agrupou os resultados em função de um dado fator (tempo de cura, tipo de cimento Portland ou teor do ligante hidráulico). Para as relações entre as resistências obtidas em carregamentos na compressão e na flexão o fator tempo de cura resultou em expressões com maiores coeficientes de determinação.

Em se tratando da relação entre resistência à tração por compressão diametral e módulo flexural, parâmetros de resistência e rigidez, respectivamente, o tipo de cimento se configurou no fator mais relevante na estimativa. Por outro lado, a relação entre resistência a compressão simples e módulo flexural apresenta melhor ajuste para o tempo de cura.

Destaca-se o ótimo ajuste na curva de estimativa da resistência à tração na flexão a partir da resistência à tração por compressão diametral em molde do tipo Marshall. Portanto, seria possível determinar a RTF em função da RTCD, sendo esse último um ensaio que demanda menos tempo de execução, menor quantidade de material e menor complexidade de execução quando comparado ao primeiro.

Espera-se com o desenvolvimento dessa pesquisa despertar estudos sobre as relações entre as propriedades mecânicas da BGTC, a fim de prever o comportamento deste material sob carregamento na flexão (mais próximo às condições de campo) a partir de ensaios de simples execução e viabilizar as atividades de anteprojetos antes da conclusão de todo plano experimental em obras rodoviárias. A intenção dos autores não é substituir os ensaios mais demorados e complexos por ensaios mais simples, mas sim apresentar alternativas para a elaboração de anteprojetos que se aproximem mais do projeto executivo.

Ressalta-se a importância da ampliação de um banco de dados com resultados de ensaios mecânicos em BGTC, a fim de confirmar as relações estabelecidas nessa pesquisa, analisar outros fatores de influência nas relações e obter melhores ajustes nas equações de estimativas propostas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LTT/UFS (Laboratório de Topografia e Transportes da Universidade Federal de Sergipe) pela infraestrutura e apoio técnico que possibilitaram a realização dos ensaios e à pedreira Rio das Pedra pelo fornecimento dos agregados desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11803: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto – Determinação de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.



- ALBUQUERQUE, F. S.; DE MENDONÇA, A. T. Análise crítica e ajuste de modelos de previsão de fadiga com análise incremental de danos para BGTC executada em pavimento asfáltico semirrígido. *TRANSPORTES*, ISSN: 2237-1346, DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1046, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 101–117, 2017.
- ALMEIDA, S. Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura. Escola de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas).
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C78/C78M. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). Estados Unidos, 2021.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C215. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. Estados Unidos, 2020.
- AUSTROADS. AP-R462: Cemented Materials Characterization. Sydney, 2014.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro: 2006. 504 p.
- DER/SP. DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. ES-P 16/18: Pavimentação: brita graduada tratada com cimento. Paraná, 2018.
- DER/PR. DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. ET-DE-P00/009: Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento – BGTC. São Paulo, 2005.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT 164-ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNER-ME 195: Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT 136-ME: Pavimentação asfáltica – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018a
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT 181/2018-ME: Pavimentação – Material estabilizado quimicamente - determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018b.
- EL-NEWIHY, A. Application of impact resonance Method for evaluation of the dynamic elastic properties of polypropylene fiber reinforced concrete. American University in Cairo, 2013. Thesis (Master of applied Science).
- KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. S.; FARIA, V. C. Comparativo entre as compactações proctor e vibratória na brita graduada tratada com cimento. In: 32º Congresso de pesquisa e ensino em transporte da ANPET, Gramado. Anais [...] Brasil, 2018. p. 2088-2097.
- 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 elaborado para a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) – Centro de pesquisas rodoviárias (CPR), Concessionária CCR Nova Dutra, Grupo CCR, 2015.
- MANDAL, T.; EDIL, T. B.; TIMJUM, J. M. Study on flexural strength, modulus, and fatigue cracking of cementitiously stabilized materials. *Road materials and pavement design*. ISSN: 1468-0629. DOI: 10.1080/14680629.2017.1325772. 2017.
- NASCIMENTO, R. S. Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).
- NCHRP. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Report 789. Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis. Washington, 2014.
- PRADO, K. Estudo de Critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).
- SAPEM. South African Pavement Engineering Manual. South African National Roads Agency Soc Ltd. 2014. 2ª edição.
- WU, P. Cement-bound road base materials. Report 7-11-218-1. PowerCem Technologies. Delft University of Technology. Julho, 2011.
- XUAN, D. X.; HOUBEN, L. J. M.; MOLENAAR, A. A. A.; SHUI, Z. H. Mechanical properties of Cement-Treated aggregate material – A review. *Materials and Design*. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.04.055. vol. 33. 2012. p. 496-502.
- YEO, Y. S.; JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. Mix design of cementitious basecourse. In: International Conference on Advances in Geotechnical Engineering. ISBN: 978-0-646-55142-5. Perth, Australia. Anais [...] Australia, 2011. p. 379-385.