



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE POLIPROPILENO NO DESEMPENHO MECÂNICO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

Felipe Simões Bacelar¹ & Fernando Silva Albuquerque²

RESUMO

Uma das principais soluções de pavimentação para alto volume de cargas de tráfego nas rodovias é a utilização de base ou sub-base de materiais cimentados, entre eles, a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). Essa mistura fornece ao pavimento aumento da rigidez, contudo, como desvantagem, apresenta ruptura frágil e prematura por fadiga, ocasionando trincamentos e elevadas deformações, com danos à estrutura do pavimento. Isso acontece, principalmente, em razão da sua baixa tenacidade e resistência à tração, ocasionando processo de micro fissuração na sua estrutura interna. Em vista disso, esta pesquisa analisou o efeito nas propriedades mecânicas da BGTC a partir da inserção de fibras de polipropileno (comercialmente: Ultimax -monofilamento individual) e comparou com a mistura padrão (sem fibra), avaliando os parâmetros resistivos, como resistência à tração, tenacidade, resistência a compressão e módulo de elasticidade. De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, obteve-se melhoria no desempenho mecânico da BGTC com a inserção de fibras. Os ganhos nos parâmetros de resistência à tração foram de 38% e tenacidade de 1189%, ambos em comparação com a BGTC padrão sem fibras. Além disso, ocorreu redução da rigidez, evidenciada pela redução nos módulos de elasticidade, no entanto sem que houvesse perda na resistência a compressão ou tração do material. Esses parâmetros resistivos são fatores fundamentais no dimensionamento de pavimentos semirrígidos construídos com BGTC. Com isso, ressalta-se que é possível obter melhoras importantes no desempenho de pavimentos que utilizem BGTC com fibras, com possibilidades de ampliar a durabilidade da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Brita Graduada Tratada com Cimento; Fibra de polipropileno monofilamento; Desempenho Mecânico.

ABSTRACT

One of the main paving solutions for high volume of traffic loads on highways is the use of a base or sub-base of cement-treated materials, including Cement-Treated Crushed Stones (CTCS). This mixture provides increased pavement stiffness; however, as a disadvantage, it presents brittle and premature fatigue failure, causing cracking and high deformations, with damage to the pavement structure. This primarily occurs due to its low tenacity and tensile strength, resulting in microcracking within its internal structure. In view of this, this study analyzed the effect on the mechanical properties of CTCS from the insertion of polypropylene fibers (commercially: Ultimax - individual monofilament) and compared it with the standard mixture (without fibers), evaluating resistance parameters, such as tensile strength, tenacity, compressive strength and Young Modulus. According to the results obtained in this research, there was an improvement in the mechanical performance of CTCS with fiber incorporation. The gains in tensile strength parameters were 38%, and tenacity increased by 1189%, both compared to standard Cement-Treated Crushed Stones without fibers. Furthermore, there was a reduction in stiffness, evidenced by decreases in Young Modulus, however without any loss in compression or tensile strength of the material. These resistance parameters are fundamental factors in the design of semi-rigid pavements constructed with CTCS. Therefore, it is highlighted that significant improvements in the performance of pavements utilizing fiber reinforced CTCS can be achieved, with potential to enhance the durability of the structure.

KEY WORDS: Cement-Treated Crushed Stones; Polypropylene monofilament fiber; Mechanical Performance.

¹ Polícia Federal, felipebacelar1@gmail.com

² Universidade Federal de Sergipe, albuquerque.f.s@academico.ufs.br



INTRODUÇÃO

No Brasil, o modal rodoviário representa significativa relevância no aspecto socioeconômico, uma vez que o transporte de cargas e o abastecimento das cidades por produtos ocorre através da malha rodoviária. Por essa razão, há uma necessidade de melhoria na concepção de projeto rodoviário no país, isso porque pavimentos deteriorados ocasionam perdas em diversos setores, por exemplo: perdas humanas; elevação dos custos de transporte; aumento do tempo de deslocamento etc.

A partir da década de 1970, pôde-se observar o uso crescente da mistura Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) na construção de rodovias no país. Esse fato está relacionado à necessidade de melhoria no desempenho dos pavimentos e de substituição de materiais utilizados até aquele momento, como Brita Graduada Simples (BGS) ou solo sem estabilizante químico (BALDO, 2007).

Esse material utiliza cimento e agregados britados em sua concepção, porém apresenta um custo e um potencial resistivo mais elevado, quando comparado aos materiais granulares convencionais de pavimentação. Essa mistura é caracterizada pela alta rigidez e, quando utilizada como camada do pavimento, apresenta concentração de tensões de tração nas fibras inferiores (BERNUCCI et al., 2022).

Apesar da BGTC apresentar elevada rigidez e menor custo de execução em comparação aos demais tipos de materiais cimentados (menor consumo de cimento Portland), várias pesquisas (PRADO, 2018; NASCIMENTO, 2017; e BALBO, 2006), têm demonstrado que a BGTC convencional apresenta elevada porosidade e heterogeneidade; baixa tenacidade e vida de fadiga. Assim, observa-se a necessidade de melhorias nas suas características físicas, e, por conseguinte, melhoria no comportamento mecânico.

Com o intuito de melhorar as características dos materiais cimentícios, como a BGTC, sugere-se utilizar fibras em meio a essa matriz cimentícia. A adição de fibras origina um material com novas características, denominado compósito. Este apresenta dois ou mais materiais diferentes, que formam uma estrutura macroscópica heterogênea e desenvolvem características intermediárias aos materiais isolados (GIBSON, 1994).

A inserção de fibras ao conjunto de BGTC pode ampliar as características críticas da matriz, o que faz melhorar principalmente sua resistência à tração, tenacidade e vida de fadiga. Esses fatores são de grande importância para evitar a degradação de camadas do pavimento construídas com BGTC. Este trabalho objetiva apresentar algumas dessas melhorias mecânicas alcançadas para uma BGTC com adição de fibras de polipropileno monofilamento em comparação à BGTC padrão sem fibras. Essa fibra é uma das estudadas em uma pesquisa tecnológica mais ampla, envolvendo fibras com características físicas e mecânicas distintas.

REFERENCIAL TEÓRICO

A BGTC é definida pela norma brasileira ANBT, 2013, como sendo uma mistura de pedra britada e cimento Portland (aproximadamente de 3 a 5% em massa da mistura total). Entre as características desse material, destaca-se o aumento na capacidade de suporte às tensões de tração e compressão, visto que, após adição do aglomerante hidráulico, a camada granular que trabalhava apenas a compressão, passa a ser solicitada em sua parte inferior por tensão de tração (BALBO, 2007).

Salienta-se que as camadas cimentadas, ao se utilizar o aglomerante hidráulico, apresentam fissuras por retração inerentes ao seu processo de cura (PINTO, 1991). Além disso, camadas estabilizadas quimicamente com cimentação desenvolvem um processo de fadiga mais acelerado, visto que sua



matriz é mais heterogênea e composta por menor teor de cimento em relação a outros materiais cimentados, como o concreto compactado a rolo. Com isso, devido a sua natureza quase-frágil, as camadas podem apresentar fissuração excessiva, bem como redução da rigidez com grande presença de nucleação (YEO, 2011).

As características físicas e propriedades mecânicas dos compósitos dependem dos componentes empregados na mistura. A BGTC apresenta boa resistência à compressão, não sendo esse um fator que limita a utilização na pavimentação, contudo sua resistência à tração e vida de fadiga são fatores que dificultam seu uso. Então, com o intuito de melhorar determinadas características que a matriz, isoladamente, apresenta deficiência, pode-se utilizar em conjunto com outro material, como as fibras.

No caso das matrizes cimentícias, ao serem unidas às fibras, interagem positivamente nas deficiências desse tipo de matriz, garantindo uma melhoria na resistência à tração, na vida de fadiga e na tenacidade. Cabe ressaltar que com a utilização de fibras há necessidade de maior energia de compactação para se chegar ao mesmo grau de compactação, quando comparado ao material sem fibras (ROOHOLAMINI; HASSANI; ALIHA, 2018).

A resistência à tração, tenacidade, controle de fissuração e vida de fadiga tendem a apresentar melhorias mais significativas com a utilização de fibras. Ademais, os compósitos passam a apresentar uma resistência residual, em que, embora a matriz tenha natureza de ruptura frágil ou quase frágil, o conjunto tende a apresentar uma ruptura dúctil ou quase dúctil, em razão da adição de fibras (ROOHOLAMINI; HASSANI; ALIHA, 2018; PEREIRA, 2017; PONS *et al.*, 2007; YAO; LI; WU, 2003; FIGUEIREDO, 2000).

No desempenho à tração dos compósitos com fibras, até a primeira fissura, a ruptura do material é determinada pela matriz cimentícia. Após o início da fissuração da matriz, as tensões são suportadas pelas fibras, em que os valores resistivos apresentam gradual decréscimo de acordo com a deformação até a ruptura. Esse fato é característico do arrancamento das fibras da matriz, denominado *pullout* (PEREIRA, 2017; HANNANT, 1978). Assim, ao adicionar fibras, essas trabalham de maneira similar ao grampo ou tirante, em que estabiliza os agregados em ambos os lados da fissura. Com isso, a fibra absorve a tensão de tração da seção da fratura, por conseguinte a concentração de tensão na área fissurada é reduzida. Devido a isso, ocorre um decréscimo do efeito do dano por trincamento e uma melhora da ductibilidade do compósito (ZHANG; LI, 2009).

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais utilizados no compósito BGTC e fibras

Conforme Figura 1a, os agregados britados utilizados nas misturas de BGTC apresentam dimensões características diferentes, totalizando cinco tipos: brita 31,5 mm, brita 19,0 mm, pedrisco, pó de pedra e filler. Ademais, fez-se necessária adição de areia fina para atingir o teor de finos necessários à composição granulométrica da curva granulométrica de diâmetro máximo de 25 mm do SAPEM (2014).

Para obtenção das características dos agregados foram realizados os ensaios de acordo com suas respectivas normas. Na Tabela 1 é apresentada a porcentagem de material que passa nas respectivas peneiras. As peneiras utilizadas foram sugeridas pela norma Sul-africana (SAPEM, 2014) em conjunto com norma do DER/SP (DER/SP, 2005). Obteve-se uma média de dois ensaios para cada tipo de agregado e apresentaram-se, entre outros aspectos, as dimensões máximas características



dos agregados, conforme NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003). Com isso, classificaram-se como: brita 31,5 mm, brita 19 mm, pó de pedra, areia e filler.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Agregados utilizados nas misturas de BGTC; (b) Fibra de polipropileno monofilamento.

Tabela 1. Análise granulométrica dos agregados.

Peneiras (mm)	% passante em massa em cada fração				
	Brita 31,5 mm (%)	Brita 19,0 mm (%)	Pó de Pedra (%)	Areia (%)	Filler (%)
37,5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
25,0	96,03%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
19,0	35,90%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
9,5	1,44%	61,27%	100,00%	100,00%	100,00%
4,8	0,83%	2,65%	96,48%	100,00%	100,00%
2,0	0,61%	1,00%	64,07%	100,00%	100,00%
0,42	0,53%	0,82%	26,51%	94,64%	100,00%
0,15	0,44%	0,74%	14,54%	12,90%	97,25%
0,075	0,31%	0,59%	5,79%	0,74%	84,30%
Massa Específica Real (g/cm ³)*	2,89	2,69	2,81	2,63	2,74
Absorção (%)*	0,82	0,92	0,95	-	-

*Prado (2018)

Os resultados de massa específica real e absorção para cada tipo de brita estão apresentados na Tabela 1. Os ensaios de absorção foram realizados apenas para os agregados que tinham material retido na peneira 4,8 mm (brita 31,5 mm, brita 19 mm e pó de pedra). Tais frações são importantes para o cálculo da quantidade de água adicionada na mistura de BGTC, devido a capacidade de absorção dos agregados graúdos.

Outros resultados observados foram o índice de forma (o qual apresentou o valor de 2,4) e a perda por abrasão Los Angeles de 16% (dezesseis por cento). A partir desses valores, observa-se que os referidos agregados atendem às exigências prescritas pelas normas (ABNT, 2013b; DER/PR, 2005; DER/SP, 2005).

Para compor a mistura de BGTC, foi escolhido o cimento do tipo II (CP II-Z-32 RS), o qual contém pequena adição de pozolana (Z) e apresenta-se como Resistente a Sulfato (RS). Essa escolha foi pautada em sua larga utilização na construção civil e por ter boas propriedades de durabilidade e resistência aos agentes químicos presentes no solo (DER/PR, 2005), bem como atende às condições da norma (ABNT, 2013a).



A fibra utilizada apresenta aspecto físico de monofilamento individual de espessura grossa (quando comparado a outros tipos de fibras), medindo 54 mm de comprimento, sendo considerada macrofibra (Figura 1b). Este material apresenta certa rugosidade para melhorar a ancoragem com a matriz. Em relação ao aspecto químico, essas fibras sintéticas são compostas por uma “mescla de poliolefinas”, verificando-se a boa compatibilidade com o cimento e os agregados. Outras características fornecidas pelo fabricante: a) Módulo de elasticidade: 9 GPa; b) Resistência à tração: 550 - 600 MPa; c) Fibras por kg: 62.500; d) Densidade (g/cm³): 0,91; e) Resistência a álcalis: total; f) Condutividade elétrica: nula; g) Absorção: nula; e h) Ancoragem: físico/química.

Nesse processo, foram considerados alguns aspectos físicos e viabilidade econômica para sua incorporação à mistura, visto que não haveria aplicação prática testar um material que fosse economicamente inviável. Para tanto, o valor financeiro das fibras incorporadas à BGTC não deveria superar 50% do preço comercial desse material. Esse custo adicional de 50% foi arbitrado nessa pesquisa, mas pode variar de acordo com vários fatores, entre eles: limite orçamentário; relação benefícios/custos maior que para BGTC tradicional; qualquer característica específica pretendida pelo projetista.

Com isso, o percentual em volume de fibras de polipropileno monofilamento adicionado à mistura foi de 0,5%, o qual já conferiu expressivos ganhos de tenacidade à mistura, conforme será discutido ao longo desse trabalho. Esse percentual em volume foi convertido em massa para a realização da sua mistura com agregados, cimento e água.

Neste trabalho, optou-se por utilizar uma das misturas estudadas por Prado (2018), cujos insumos eram os mesmos. A mistura escolhida era denominada “5B (-1)”, sendo: o numeral “5” referente a 5% de cimento em massa; a letra “B” refere-se à faixa granulométrica utilizada (SAPEM, 2014); e, por último, o numeral “-1”, faz referência à utilização de -1% (percentual referente à massa da mistura) abaixo da umidade ótima do material. Utilizou-se 5% de cimento e 1% abaixo da umidade ótima, pois foi a mistura que apresentou melhores características mecânicas no referido trabalho.

Após definidos os percentuais passantes em cada diâmetro de referência da faixa granulométrica, encontraram-se as seguintes proporções por tipo de agregado: 20,00% de brita 31,5 mm; 26,00% de brita 19,0 mm; 46,00% de pó de pedra; 3,50% de filler; 4,50% de areia.

Após encontrada a curva ajustada para os agregados, foi realizada uma correção para determinação da massa dos agregados em função da porcentagem fixa de cimento em massa (5%), visto que a porcentagem do cimento em massa entra na contabilização da mistura, ou seja, deve haver substituição dos agregados para inclusão do cimento.

Além disso, a mesma quantidade de material retido na peneira 19 mm foi substituído por material passante na 19 mm e retido na 4,8 mm, devido à necessidade de compatibilização do comprimento das fibras com os agregados e CPs. Portanto, houve alteração na faixa granulométrica inicial, sendo ajustada conforme os parâmetros indicados, resultando em uma granulometria com maior superfície específica, o que resultaria na necessidade de mais água. Essas condições certamente resultaram em uma mistura com umidade além de 1% abaixo da ótima, o que se tornou importante para avaliar a capacidade de homogeneização das fibras na mistura, mesmo na deficiência de água.

Avaliações realizadas às misturas

A energia de compactação utilizada foi a Proctor modificada, uma vez que, grande parte das referências bibliográficas consultadas demonstrou ganho no desempenho mecânico da BGTC com a utilização dessa energia (Klinsky; Farias, 2016; Yeo, 2011; SAPEM, 2014; AUSTRROADS, 2008).



As características de compactação estão apresentadas na Tabela 2. Como a adição de fibras altera em menos de 0,5% a massa da mistura, não houve alteração da umidade e peso específico aparente seco máximo da mistura. Ademais, esses valores serviram para subsidiar o cálculo da quantidade de água adicionada à mistura para atingir a correta umidade de moldagem dos corpos de prova (CP) para os ensaios.

Tabela 2. Resultado de ensaios (PRADO, 2018).

Parâmetros	Resultados
Teor de Cimento	5%
Peso específico aparente seco máximo	22,36 kN/m ³
Teor de umidade de moldagem (fração passante na peneira 4,8 mm)	(9,8)-(1,00) = 8,8%
Relação água/cimento	1,96

Inicialmente os agregados foram separados percentualmente de acordo com Tabela 1. Em seguida foram divididos pela peneira 19 mm. Caso houvesse material retido nessa peneira, ocorreria uma substituição em massa da quantidade desse material retido por um material que passa na peneira 19 mm e fica retido na 4,8 mm. Esse procedimento, estabelecido pela DNER-ME 162/94, serviu para garantir que o diâmetro máximo do agregado fosse 19 mm, assim havendo compatibilidade com os moldes e o tamanho das fibras utilizadas. Além disso, fez-se o peneiramento na peneira 4,8 mm com a finalidade de determinar a massa passante e a retida. Isso serviu para determinação da água adicionada na moldagem dos corpos de prova.

Com o resultado das frações passantes e retidas na peneira 4,8 mm das amostras já separadas foi realizado o cálculo da água. Para a fração retida é considerada a água de absorção do agregado graúdo, conforme DNER-ME 162/94. Já para o material passante, o cálculo é similar à determinação da quantidade de água que deve ser adicionada para atingir a umidade de moldagem.

Com isso, foram confeccionados os corpos de prova para cada tipo de ensaio a fim de analisar as variações dos parâmetros para as misturas com e sem adição de fibras. No processo de confecção dos CPs, as fibras foram inseridas em meio aos agregados e cimento durante o processo de homogeneização à seco. Só após essa etapa a água foi adicionada à mistura. O processo de homogeneização da mistura úmida com fibras foi relativamente simples. Contudo, devido às dimensões reduzidas do molde cilíndrico de compressão, durante o processo de colocação do material no seu interior, percebeu-se que as fibras não mantinham um padrão direcional único para CPs diferentes, o que sugere ser a causa da possível diferença nos ganhos de resistência proporcionados entre eles. Os CPs foram moldados na energia Proctor modificada e após a moldagem os CPs foram embalados com filme plástico para que se iniciasse a pega do cimento e possibilitasse a retirada do CP sem causar danos. Após 24 horas, os CPs foram desmoldados e imediatamente embalados em um filme plástico novamente para que houvesse a cura do cimento, durante 28 dias em temperatura e umidade ambiente, simulando assim as películas impermeabilizantes para a cura em condições de obra.

Os parâmetros analisados nesse trabalho foram Resistência à Tração na Flexão (RTf) e Tenacidade, Resistência à Compressão (RCS) e Módulo de Elasticidade (E). Os métodos adotados, resultados obtidos e discussões são apresentados nos itens seguintes.

Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Elasticidade (E)

Os ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS) e Módulo de Elasticidade (E) foram realizados em corpos de prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, compactados



na energia Proctor modificada por impacto em cinco camadas. O grau de compactação de no mínimo foi definido em 100% (até + 2% desse valor) e uma umidade poderia ter desvio de $\pm 0,5\%$. Para determinar a resistência à compressão simples foi realizado o ensaio de compressão axial nas misturas. O ensaio foi realizado de acordo com NBR 5739 (ABNT, 2007). Durante o ensaio o carregamento foi aplicado com velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s até a queda brusca da força, o que indica a ruptura do CP.

Já o ensaio para obtenção do módulo de elasticidade foi realizado conforme o método utilizado para concretos, de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2008), visto que ainda não havia padrão para a BGTC na época da pesquisa. Para iniciar o ensaio, foi necessário que se soubesse o valor de resistência à compressão simples da mistura ensaiada, pois a determinação do módulo de elasticidade é realizada na tangente inicial, ou seja, a 30% do valor da resistência à compressão.

Em cada lado do CP, no terço médio de sua altura (Figura 2), foram instalados dois extensômetros (dispositivos para medir as deformações). A velocidade de carregamento e descarregamento foi de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. A tensão foi aplicada até que se atingisse 30% da tensão de compressão do material e esse nível de tensão foi mantido por 60 segundos. Decorrido esse tempo, a carga foi reduzida (com a mesma velocidade do carregamento) até atingir a tensão de 0,5 MPa, para que o contato entre a prensa e o CP não fosse perdido. O procedimento de carga e descarga foi repetido por 4 vezes e o módulo de elasticidade calculado a partir da relação entre tensão de compressão na seção transversal do CP e sua respectiva deformação específica na mesma direção.



(a)



(b)

Figura 2. Ensaio em misturas cimentadas: a) Resistência à Compressão Simples; b) Módulo de Elasticidade.

Ensaio de Resistência à Tração na Flexão (RTf) e Tenacidade na Tração na Flexão (TTF)

Os CPs utilizados tinham forma prismática com dimensões de 10 cm de largura, 10 cm de altura e 40 cm de comprimento, de acordo com os padrões do protocolo NCHRP (2014). Essas distâncias são definidas conforme o diâmetro máximo do agregado, segundo preconiza a norma AS1012 (STANDARDS AUSTRALIA, 2000) e a norma ASTM C78/C78M-15b (ASTM, 2015).



A compactação dos CPs foi realizada pela prensagem estática do CP, executada em 3 (três) camadas de mesma altura. A massa total da mistura de BGTC, que foi inserida em cada viga, foi definida a partir do peso específico aparente seco máximo, da umidade ótima e do volume do CP. A prensagem foi realizada por uma força de compressão variável e crescente, aplicada até que se chegasse à altura desejada, a fim de garantir o grau de compactação desejado ($100\% \pm 2\%$) para energia Proctor modificada.

A prensa utilizada foi uma máquina universal de ensaios, cuja célula de carga acoplada na prensa tem capacidade de 200 kN. Utilizou-se um pórtico específico para aplicar o carregamento em quatro pontos. Esse implemento caracteriza-se por aplicar duas cargas concentradas no terço médio na parte superior (distantes 10 cm entre os pontos de carregamento) e simplesmente apoiado em dois pontos na parte inferior (distantes 30 cm entre os pontos de apoio). Essa configuração permite que a aplicação da carga seja imposta como uma flexão pura no terço médio da vigota.

A aplicação da carga foi realizada de maneira contínua e sem choque. A taxa de carregamento foi de 0,9 MPa/min até a ruptura do CP, como descreve a ASTM C78 (2015). Para o cálculo da resistência, foi analisado o local de ruptura de cada CP, visto que há duas possíveis equações, diferenciando-se em razão do local da trinca.

Caso o trincamento ficasse dentro ou fora ($< 1,5$ cm) do terço médio da vigota, a resistência seria encontrada, respectivamente, por:

$$RTf(MPa) = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$

$$RTf(MPa) = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (2)$$

Onde: RTf = resistência à tração na flexão em quatro pontos (MPa); P = carga máxima aplicada (N); L = dimensão do vão entre apoios (mm); a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm); b = largura média da viga (mm); h = altura média da viga (mm).

Com o resultado do ensaio de RTf, foi possível medir o valor da tenacidade, que é equivalente a área do gráfico do ensaio (Carga x Deflexão). A área desta curva é delimitada pelo seu ramo ascendente e seu ramo descendente, até que se atinja um patamar de 40% da Força Máxima no ramo descendente. Com isso, é possível determinar a energia absorvida sob tensão de tração no ensaio de flexão estática, encontrando-se a tenacidade (TTF). Com o *software* AutoCAD, foi possível calcular as áreas de cada gráfico construído para os CPs.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da execução dos ensaios e obtenção dos resultados de RCS, E, RTf e TTF, foi possível avaliar como as fibras interagem com a mistura antes e após a ruptura da matriz cimentada, contabilizando as vantagens e desvantagens de sua inserção na mistura de BGTC.

Observando os resultados de RCS (Tabela 3), constata-se um decréscimo de 13% na resistência à compressão da mistura com fibras, mas mantendo um valor bem acima do mínimo requerido para este tipo de material (conforme NBR 12261/2013, valor de resistência média deve ser maior que 3,5 MPa). Isso não corresponde, necessariamente, a um resultado indesejado, pois é um indicativo de ganho de flexibilidade à mistura, o que reduz também os níveis de tensões no material ao se aplicar carregamentos.



Também pôde-se constatar que houve uma tendência de decréscimo do módulo de elasticidade sob compressão com a inserção das fibras (Tabela 4). Com isso, o compósito passou a ter uma tendência a ser menos rígido que a BGTC tradicional. Como a redução de rigidez do compósito em comparação à BGTC tradicional foi maior que a redução de RCS, a relação mais baixa e favorável entre módulo de elasticidade e resistência à compressão foi da mistura com fibras. Essa constatação configura-se como um dos benefícios da utilização das fibras, pois pode conferir também maior durabilidade ao material.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de resistência compressão simples.

Tipo de Fibra	RCS [MPa]	Média [MPa]	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Percentual de Ganho
Sem Fibras	8,35 8,06	8,21	0,20	2,50%	0%
Fibra de Polipropileno Monofilamento	6,87 7,44	7,15	0,40	5,54%	-13%

Tabela 4. Resultado do ensaio de Módulo de Elasticidade.

Tipo de Fibra	E [GPa]	Média [GPa]	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Percentual de Ganho	E / RCS
Sem Fibras	10,14 11,12	10,63	0,69	6,52%	0%	1295
Fibra de Polipropileno Monofilamento	7,17 7,79	7,48	0,44	5,86%	-30%	1046

A partir do ensaio de tração na flexão em quatro pontos, foi possível observar o trabalho das fibras após a ruptura da matriz, em que ocorre um pico de força em aproximadamente 0,5 mm de deformação e depois a força decresce. Logo após essa queda ocorre um crescimento das curvas de resistência residual, em que é possível identificar o trabalho das fibras (Figura 3).

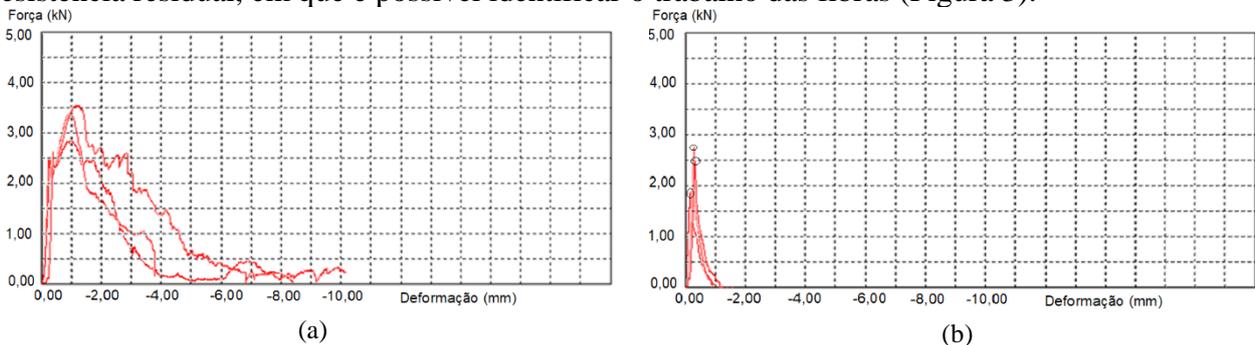


Figura 3. Ensaio de flexão em 4 pontos: a) BGTC com fibras; e b) BGTC sem fibras.

Além disso, salienta-se que a ruptura inicial do compósito ocorre no mesmo patamar de força (2,5 kN), ou seja, o mesmo nível em que ocorre a ruptura da BGTC sem fibra. Assim, verifica-se que as fibras não atuam antes da ruptura da matriz e não fornecem significativos ganhos de resistência inicial de tração à matriz.

Nos gráficos da Figura 3, fica evidente o trabalho das fibras, sendo observados os acréscimos e os decréscimos de tensões (após o pico máximo), após atuarem até os seus arrancamentos (Figura 4). O resumo dos resultados de RTf está apresentado na Tabela 5.

A fibra avaliada apresentou bom desempenho no ensaio de tração na flexão. Fica evidente a boa compatibilidade desse tipo de fibra com a matriz de BGTC para suportar as tensões de tração impostas ao compósito, provavelmente devido à semelhança entre sua rigidez e a da matriz de



BGTC (módulos de elasticidade semelhantes). Observa-se boa aderência entre a fibra e a matriz, resultando em bom desempenho também após a ruptura da matriz (Tabela 6).



Figura 4. Evolução e detalhe do trabalho das fibras do ensaio de flexão em 4 pontos.

Tabela 5. Resultado do ensaio de Resistência à Tração na Flexão em 4 pontos.

Tipo de Fibra	Grau de Compactação	de RTf [MPa]	Média [MPa]	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Percentual de Ganho/Perda	Deformação na Ruptura
Sem Fibras	100,2%	0,56	0,71	0,06	8,38%	-	886,96
	100,1%	0,83					1513,04
	99,9%	0,75					1721,74
Fibra Ultimax	98,7%	0,86	0,98	0,10	10,51%	38%	5217,39
	99,6%	1,01					6365,22
	98,0%	1,06					6104,35

Em relação a deformação na ruptura, observa-se que as misturas deste trabalho apresentaram elevada deformação na ruptura em comparação com valores evidenciados na literatura para BGTC, além disso pode-se verificar aumento da referida deformação quando na utilização de fibra em conjunto com a BGTC. Salienta-se que mesmo havendo aumento da deformação na ruptura para as misturas de BGTC com fibra, houve bons resultados de RTf, inclusive com ganho resistivo em comparação à BGTC padrão sem fibra.

Diante dos resultados obtidos, pode-se constatar elevados ganhos de Tenacidade (Tabela 6). Isso ocorreu devido a tensão de tração residual fornecida pelas fibras após a ruptura da matriz, no ensaio de flexão. Ademais, notam-se valores elevados para o coeficiente de variação, que pode ter acontecido em razão do arranjo das fibras em cada CP, assim influenciando na resistência residual de cada CP. Dependendo de tal arranjo, houve maior ou menor número de fibras atuando no eixo tracionado, influenciando na disponibilidade de atuação de uma fibra após o arrancamento de outra.

Tabela 6. Resultado de Tenacidade na Tração na Flexão em 4 pontos.

Tipo de Fibra	Grau de Compactação	TTF [N.mm]	Média [MPa]	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Percentual de Ganho/Perda
Sem Fibras	100,2%	361,34	395,57	37,41	9,46%	-
	100,1%	389,87				
	99,9%	435,51				
Fibra de Polipropileno Monofilamento	98,9%	4315,56	5097,55	1579,92	30,99%	1189%
	99,5%	4061,13				
	99,0%	6915,96				



CONCLUSÕES

O compósito formado por Brita Graduada Tratada com Cimento e fibras de Polipropileno Monofilamento pode fornecer expressivas melhoras de flexibilidade, resistência à tração e tenacidade em comparação à BGTC tradicional.

Para as misturas ensaiadas nessa pesquisa, a relação entre rigidez e resistência (módulo de elasticidade e resistência) reduziu com a inserção de fibras, o que pode ser um fator positivo para suportar mais ciclos de carregamento.

No ensaio de resistência à tração na flexão em 4 apoios, pôde-se observar o trabalho das fibras mesmo após o rompimento da matriz, em que foi evidenciado um ganho de 38% nesse parâmetro resistivo devido a adição de fibras.

Na avaliação de tenacidade à flexão, quando se constatou um ganho de 1189% nessa característica após a adição das fibras, o comportamento à ruptura do material passou de quase-frágil da BGTC tradicional, para uma ruptura dúctil do compósito.

Ressalta-se a boa compatibilidade entre a matriz e as fibras de polipropileno, as quais apresentam módulos de elasticidade em patamares similares. Além de seus aspectos físicos favorecerem à ancoragem das fibras, que apresentam certa rugosidade com a finalidade de fornecer mais ancoragem e mais tração entre a matriz e as fibras.

O compósito formado por Brita Graduada Tratada com Cimento e fibras de Polipropileno Monofilamento obteve expressivas melhoras mecânicas a um custo competitivo com a inserção das fibras. Isso pode torná-lo em um material relevante para a aplicação em pavimentos semirrígidos e rígidos de alto desempenho estrutural.

As limitações do trabalho se dão devido à grande variedade de tipos de fibras (material de composição da fibra, comprimento e aspecto) que podem ser utilizadas. Além disso, alteração no teor de cimento (em quantidades menores àquelas apresentadas neste trabalho) pode influenciar sobremaneira na interação e aderência entre as fibras e a matriz de BGTC. Esses fatores podem interferir diretamente no resultado alcançado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

_____. NBR NM 248: Agregado – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão e corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 12261: Dosagem de brita graduada tratada com cimento — Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 11803: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento — Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM, C78/C78M: Standard Test Method for Flexural Strength of concrete (using simple beam with third-point loading), ASTM, 2015.

AS 1012.11-2000 - Methods of testing concrete: method 11: determination of the modulus of rupture, STANDARDS AUSTRALIA, 2000.

AUSTROADS Technical Report. **The development and evaluation of protocols for the laboratory characterization of cemented materials** 2008.



- BALBO, J. T. Brita graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura, Transportes, volume XIV, número 1, junho de 2006. ISSN: 1415-7713.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**, São Paulo, Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. L. B; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J. B.; CERATTI, J. A. P., **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: 2ª Edição PETROBRAS. ABEDA, 2022.
- DER/SP- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO DER/SP-ET-DE-P00/009: Especificação Técnica: sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento. São Paulo, 2005.
- DER/PR - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ DER/PR-ESP-P16: **Pavimento**: brita graduada tratada com cimento. Paraná, 2005.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNER-ME 162: Solos-Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994b.
- FIGUEIREDO, A. D. 2000. **Concreto com Fibras de Aço**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/260. 68p.
- GIBSON, R. F. 1994. **Principles of Composite Material Mechanics**. Detroit: McGraw-Hill, Inc.
- NASCIMENTO, R. **Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR101/SE**. 2017. 143p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis**: NCHRP – Report 789. Washington, D.C. 82p. 2014.
- HANNANT, D. J. 1978. **Fibre Cements and Fibre Concretes**. Chichester: John Wiley.
- SAPEM, **South African Pavement Engineering Manual**. 2014. South African National Roads Agency Ltd.
- 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, 153p, Relatório. Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) e Concessionária CCR Nova Dutra, Grupo CCR, Rio de Janeiro.
- PEREIRA, G. B. S. Comportamento à flexão de vigas de concreto autoadensável armado reforçado com fibras de aço. Rio de Janeiro, 2017.
- PINTO, Salomão. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Rio de Janeiro, 1991.
- PONS, G., MOURET, M., ALCANTARA, M., GRANJU, J. L. 2007. **Mechanical behaviour of self-compacting concrete with hybrid fibre reinforcement**. Materials and Structures, vol. 40, n. 2, pp. 201-210.
- PRADO, K. **Estudo de critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento**. 2018. 161p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.
- ROOHOLAMINI, H.; HASSANI, A.; ALIHA, M. R. M. Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 517-529, 2018.
- YAO, W.; LI, J.; WU, K. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 1, p. 27-30, 2003.
- YEO, Y.S. **Characterization of cement-treated crushed rock base course for Western Australian Roads**, 2011, 227p, Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Curtin University, School of Civil and Mechanical Engineering, Australian.
- ZHANG, P.; LI, Q. **Effect of polypropylene fiber on mechanical and shrinkage properties of cement stabilized macadam**. International Journal of Pavement Engineering, v. 10, nº 6, p. 435-445, 2009. <https://doi.org/10.1080/10298430802363985>