

PARÂMETROS DE TENACIDADE À FLEXÃO DE CONCRETO PROJETADO COM FIBRAS DE POLIOLEFINA PARA REVESTIMENTO EM TÚNEIS

Claudeny Simone Alves Santana
Luiz Antonio Vieira Carneiro
Ana Maria Abreu Jorge Teixeira
Tribunal de Contas do Estado do Piauí
Universidade Federal Fluminense
Instituto Militar de Engenharia

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar os parâmetros de tenacidade à flexão de um concreto projetado com fibra de poliolefina de 0,70 mm x 0,35 mm x 50 mm de dimensões para revestimento em túneis do tipo NATM (*New Austrian Tunneling Method*). Foram executadas três composições de concreto de 40 MPa de resistência média à compressão. O parâmetro variado nos concretos foi o teor volumétrico das fibras (0%, 0,25% e 0,50%). Realizaram-se ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos de concreto de 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões para a determinação da resistência média à tração na flexão e da curva carga-flecha. Verificou-se que a adição de fibras de poliolefina nos concretos conduziu ao aumento de sua tenacidade à flexão.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the flexural tenacity parameters of a sprayed concrete with polyolefin fiber of 0.70 mm x 0.35 mm x 50 mm in dimensions for coating in NATM (*New Austrian Tunneling Method*) tunnels. Three concrete mixes were designed with a concrete of 40 MPa mean compressive strength. In each concrete mix, fiber volume fraction (0%, 0.25% and 0.50%) was varied. Flexural tests in prismatic concrete specimens of 100 mm x 100 mm x 400 mm were performed to determine the mean flexural strength and the load-deflection curve. It was found that the addition of polyolefin fiber in concrete led to increasing in its flexural tenacity.

1. INTRODUÇÃO

A adição de fibras no concreto altera o seu mecanismo de fissuração e aumenta a sua tenacidade à fratura pela ação de ponte nas micro e microfissuras da matriz.

No processo de microfissuração do concreto, os efeitos da ação de ponte (descolamento, deslizamento, arrancamento ou escoamento das fibras) afetam a coalescência e propagação das microfissuras. Isto leva a retardar e controlar a microfissuração. Este mecanismo aumenta a demanda de energia para o avanço da fissura.

Os principais benefícios que as fibras trazem ao concreto são o aumento da capacidade de deformação (ductilidade), de absorção de energia de deformação (tenacidade), da resistência ao cisalhamento e da resistência ao impacto, e a homogeneização da distribuição das fissuras. Estes benefícios são influenciados pelo fator de forma, teor e resistência à tração das fibras, além das condições de aderência, que dependem da zona de transição fibra-matriz e da configuração da fibra.

A tenacidade de um concreto com fibras corresponde à área sob a curva carga-flecha, que expressa o trabalho dissipado no concreto com fibras até um determinado valor de flecha e avalia o desempenho de um concreto com fibras.

Para a determinação dessa curva carga - flecha, realiza-se o ensaio de flexão de um corpo de prova prismático de concreto com fibras sob quatro pontos, conforme as normas americanas ASTM C1018 (1997), ASTM C1609 (2010) e ASTM C1399 (2010) e japonesa JSCE-SF4

(1984), ou o ensaio de flexão de um corpo de prova prismático de concreto com fibras com entalhe sob três pontos, segundo a norma europeia EN 14651 (2007), porém neste trabalho, este último ensaio não foi realizado.

O valor da tenacidade de um concreto com fibras depende de vários fatores, entre estes, as dimensões, geometria e moldagem do corpo de prova, a resistência, teor e espaçamento das fibras, a taxa, configuração e velocidade de carregamento no ensaio, entre outros.

De todas as aplicações, a que consome maior volume de material e, portanto, traduz-se na sua maior aplicação, é a execução de túneis através do método NATM (*New Tunnel Australian Method*), pois nesse método, desde a estabilização inicial das aberturas, a composição da estrutura definitiva do túnel e o seu revestimento, se processa através de formação de camadas de concreto projetado (Gasparim, 2015). A flexibilidade do processo torna a projeção a seco bastante atrativa na execução de primeiro suporte de escavações subterrâneas (revestimento primário), principalmente quando há ocorrência de infiltrações de água no maciço (Prudêncio, 2005).

Objetivou-se neste trabalho avaliar os parâmetros de tenacidade à flexão de um concreto projetado com fibra de poliolefina de 0,70 mm x 0,35 mm x 50 mm de dimensões.

Foram executadas três composições de concreto de 40 MPa de resistência média à compressão. Variou-se nos concretos o teor volumétrico das fibras (0%, 0,25% e 0,50%). Realizaram-se ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos de concreto de 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões para a determinação da resistência média à tração na flexão e da curva carga-flecha.

Os parâmetros de tenacidade à flexão do concreto projetado com fibra de poliolefina foram avaliados por meio da norma americana ASTM C1609 (2010) e japonesa JSCE - SF4 (1984).

2. TÚNEIS NATM

A metodologia NATM (*New Austrian Tunelling Method*), segundo Amaral *et al.* (1980), baseia-se na substituição do conceito de escoramento pelo de estabilização da escavação, despertando as resistências intrínsecas dos maciços durante a fase de escavação. É de se ressaltar que o emprego deste método só foi possível a partir do advento de equipamentos que possibilitavam escavações mais rápidas e de novos materiais de revestimento (concreto projetado), permitindo um controle eficaz sobre as deformações dos terrenos vizinhos à escavação.

Hoek *et al.* (1995) constataram que existe uma complexa interação entre o maciço rochoso em torno de uma abertura e uma camada de concreto projetado de espessura variável com propriedades que mudam à medida que ocorre a cura do compósito, isto, desafia a maioria das tentativas de análise teórica. No entanto, há o controle da deformação causada no maciço rochoso, particularmente quando usado em combinação com outros dispositivos utilizados na manutenção do suporte, como tarugos ou cabos. O concreto projetado utilizado em túneis, como reforço estrutural, permite que as cargas sejam transmitidas através de uma grande área para o maciço rochoso subjacente.

Campanhã e Boscov (1998) também destacaram os sistemas de escoramento no terreno em concomitância com o lançamento do concreto projetado, até que se adquira a resistência necessária para sua autossustentação, que são: cambotas, tirantes, malhas de aço e fibras de aço.

Assim, os túneis executados pelo método NATM tendem a apresentar revestimentos mais leves, escavação mais rápida, e são mais econômicos e flexíveis.

3. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA TENACIDADE

3.1. Método ASTM 1609 (2010)

O Método ASTM 1609 (2010) aborda um ensaio padrão para a determinação da resistência média residual de concretos com fibra submetidos à tração na flexão, além de fornecer uma medida quantidade útil do desempenho de concretos com fibra.

Esse método utiliza os mesmos procedimentos que a norma ASTM C1018 (1997) para se obter a curva tensão - deformação, mas a curva resultante é analisada de uma maneira totalmente diferente. Ao invés dos índices de tenacidade, as resistências residuais são determinadas diretamente da curva. Segundo Islam (2012) este procedimento é mais sensível a diferentes tipos de fibras e volumes em comparação à norma ASTM C1018 (1997).

O Método ASTM 1609 (2010) recomenda o uso de corpos de prova similares aos da norma ASTM C1018 (1997) e define que a largura e a altura do corpo de prova devem ser maiores que 3 vezes o comprimento da fibra.

A resistência residual é calculada a partir da carga sustentada após a fissuração do concreto para determinados valores de flecha (Salvador, 2012).

A Equação 1 apresenta a fórmula para a determinação da resistência à flexão de primeira fissura (f_1), enquanto as Equações 2 e 3, as resistências residuais nas flechas $l/600$ e $l/150$ para corpos de prova de altura h (f_{600}^h e f_{150}^h), que estão relacionadas ao estado limite de serviço e ao estado limite último, respectivamente.

$$f_1 = P \frac{l}{b h^2} \quad (1)$$

$$f_{600}^h = P_{600}^h \frac{l}{b h^2} \quad (2)$$

$$f_{150}^h = P_{150}^h \frac{l}{b h^2} \quad (3)$$

em que P : carga de primeira fissura;
 P_{600}^h : carga residual correspondente ao vão $l/600$;
 P_{150}^h : carga residual correspondentes ao vão $l/150$;
 L : vão livre;
 b : largura do corpo de prova; e
 h : altura do corpo de prova.

A Figura 1 ilustra o posicionamento das cargas residuais no gráfico de curva carga-flecha para

determinação da tenacidade segundo a norma apresentada.

A Equação 4 mostra a expressão para o cálculo do coeficiente de resistência à flexão equivalente ($R_{T,150}^h$), que é um parâmetro adimensional expresso em percentagem e obtido pela relação entre a tenacidade calculada até o valor de flecha igual a $l/150$ e o produto entre a carga de primeira fissura e a flecha $l/150$.

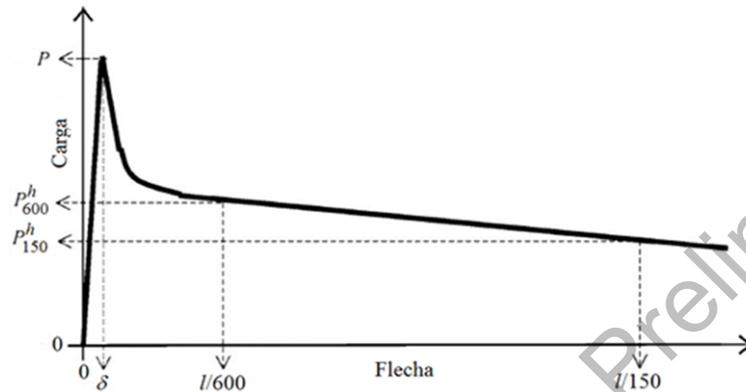


Figura 1: Características das curvas carga - flecha segundo a norma ASTM C1609 (2010)

$$R_{T,150}^h = 100\% \cdot \frac{150}{b h^2 f_1} T_{150}^h \quad (4)$$

em que T_{150}^h : área total abaixo da curva carga - flecha até o valor de flecha igual a $l/150$ (tenacidade) para o corpo de prova de altura h .

3.2. Método JSCE – SF4 (1984)

O método JSCE – SF4 (1984) trata sobre método de ensaio para a determinação da resistência à flexão e da tenacidade de concreto com fibra de aço. É o método mais utilizado para a determinação dos parâmetros de resistência e tenacidade de concretos com fibra.

Esse método recomenda o uso de corpos de prova prismáticos de 100 mm x 100 mm x 350 mm (vão livre de 300 mm) ou de 150 mm x 150 mm x 500 mm (vão livre de 450 mm) de dimensões e define que a largura e a altura do corpo de prova devem ser maiores que 3 vezes o comprimento da fibra.

A partir da curva carga - flecha (v. Figura 2), pode-se obter a resistência à tração na flexão do concreto com fibra ou módulo de ruptura à flexão (σ_b) com o uso da Equação 5 e o fator de tenacidade à flexão (σ_b^-) por meio da Equação 6.

$$\sigma_b = P \frac{l}{b h^2} \quad (5)$$

$$\sigma_b^- = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \frac{l}{b h^2} \quad (6)$$

em que P : carga de pico da curva carga-flecha;

T_b : tenacidade à flexão que corresponde à área total sob a curva carga-flecha;

- δ_{ib} : flecha igual a $l/150$;
- l : vão livre;
- b : largura do corpo de prova; e
- h : altura do corpo de prova.

A Figura 2 apresenta o gráfico carga – flecha para fins de determinação dos cálculos necessários à determinação da tenacidade.

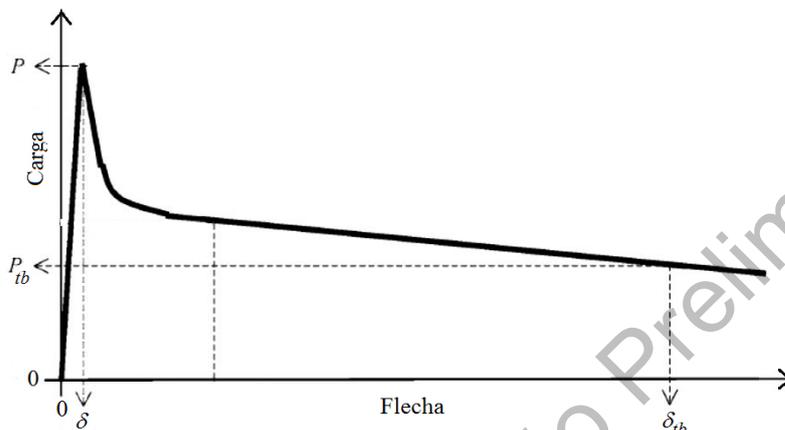


Figura 2: Características das curvas carga - flecha segundo a norma JSCE - SF4 (1984)

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foram confeccionados, em uma obra de drenagem em um talude de solo na cidade de Belo Horizonte/MG, três grupos de concreto, perfazendo um total de 15 corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm de dimensões. A resistência média do concreto à compressão era de 40 MPa. O parâmetro variado nos concretos foi o teor volumétrico das fibras ($V_f = 0\%$, $V_f = 0,25\%$ e $V_f = 0,50\%$). Realizaram-se ensaios para a determinação da resistência média à tração na flexão e da curva carga-flecha.

Os corpos de prova de concreto, obtidos por meio do processo de projeção do concreto por via úmida, foram executados sob orientação da norma ABNT NBR 13070 (2012) e das recomendações EFRNAC (1996). A projeção do concreto foi realizada com o uso do equipamento Putzmeister TK - 40 com mangote de transporte de 100 mm de diâmetro e pressão acima de 0,5 MPa.

Os moldes de todos os corpos de prova de concreto foram cobertos com plásticos para se evitar a perda de água, após o que foram colocados em ambiente coberto durante 21 dias, transportados para o Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do Instituto Militar de Engenharia, localizado na cidade do Rio de Janeiro/RJ e, então, desformados e deixados sob ambiente do laboratório.

Após a cura do concreto em 28 dias, foram realizados ensaios de flexão simples para a determinação de sua resistência à tração indireta na flexão, conforme a norma ABNT NBR 12142 (2010), por meio do uso da prensa universal servo-hidráulica da marca CONTENCO com capacidade de 1000 kN.

A partir do ensaio de flexão das vigotas de concreto de 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões, foram coletados os valores de flecha no meio do vão por meio de um LVDT, cuja

a disposição do ensaio pode ser visto na Figura 3. O vão do ensaio (vão livre) foi de 360 mm e a distância entre as cargas aplicadas (cutelos), 120 mm.



Figura 3: Disposição do ensaio de flexão.

4.1. Materiais

O cimento Portland utilizado em todos os grupos de concreto foi o do tipo CP V ARI PLUS, enquanto o aditivo foi do tipo polifuncional Mastermix 397N, da BASF.

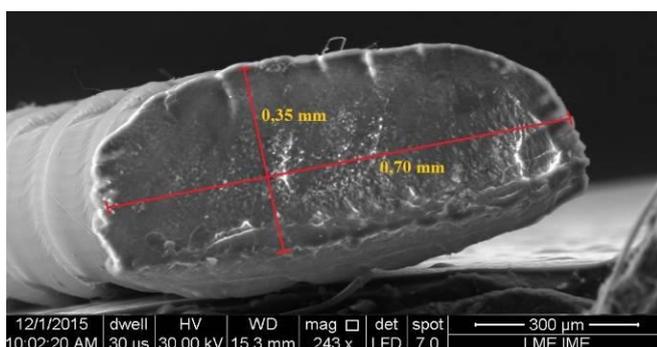
O agregado miúdo empregado na elaboração dos concretos foi uma areia média de uma jazida residual localizada no entorno da cidade de Belo Horizonte/MG, cujos valores de peso específico, módulo de finura e dimensão máxima característica foram iguais a $26,3 \text{ kN/m}^3$, 2,78 e 2,4 mm.

O agregado graúdo utilizado foi brita do tipo granito (brita 0). Os valores de massa específica, módulo de finura e dimensão máxima característica da brita 0 foram iguais a $27,3 \text{ kN/m}^3$, 1,89 e 12,5 mm.

As fibras de poliolefina utilizadas neste trabalho, da marca Concrux e comercializadas pela empresa suíça Brugg Contec, são macrofibras bicomponentes, com superfície rugosa que assegura uma ligação com a argamassa de concretos. Possuem cor amarela clara, translúcida, de aspecto tenro e áspero. São comercializadas em pacotes de 3 kg de massa e agrupadas em cilindros envoltos de filme plástico com 50 mm de comprimento, conforme ilustra a Figura 4. As características das fibras de poliolefina, segundo o fabricante e conforme os resultados de ensaios (Santana, 2017), podem ser visualizadas na Tabela 1. Constatou-se que os valores dos ensaios de resistência à tração e módulo de elasticidade foram cerca de 26% inferiores aos do fabricante.



Figura 4: Disposição da fibra de poliolefina para comercialização (Santana, 2017)



(a) Aumento de 240 X da seção transversal

(b) Vista segundo catálogo do fabricante

Figura 5: Vistas das seções transversal e longitudinal da poliolefina (Santana, 2017)

Comparando-se a micrografia mostrada na Figura 5a, obtida a partir de ensaio de microscopia eletrônica de varredura realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Seção de Engenharia de Materiais do Instituto Militar de Engenharia, com a que é visualizada na Figura 5b, segundo catálogo do fabricante, notou-se que a seção transversal da fibra de poliolefina pode-se assemelhar a uma seção elíptica de eixos de 0,35 mm x 0,70 mm de dimensões.

Por conta disso, neste trabalho, a fim de se obter o fator de forma desta fibra (v. Tabela 1), adotou-se um diâmetro equivalente, que foi calculado igualando-se o valor da área da seção transversal elíptica real ao de uma seção transversal circular, cujo diâmetro equivalente resultante foi de 0,50 mm.

Tabela 1: Características das fibras de poliolefina utilizadas neste trabalho

Característica	Fabricante	Laboratório
Densidade real	0,91	0,91
Comprimento (mm)	50	50
Diâmetro equivalente (mm)	0,50	0,50
Fator de forma	-	100
Resistência a ácidos/alcális	Inerte	-
Módulo de elasticidade (GPa)	>11	8,2
Ponto de amolecimento	150 °C	150 °C
Resistência à tração (MPa)	590	439

4.2. Concretos

Foram confeccionados três tipos de concretos, sendo dois deles com fibra de poliolefina. Aqueles que não continham fibras foram dosados para uma resistência à compressão média próxima de 40 MPa.

A Tabela 2 mostra a quantidade em peso, de material empregado por volume de concreto para cada grupo. O concreto sem fibras apresentou valor de abatimento de tronco de cone cerca de $150 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ (v. Figura 6), enquanto os concretos com $V_f = 0,25\%$ e $V_f = 0,50\%$, $100 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ e $90 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Na Figura 7 podem ser vistos os valores médios de resistência à tração na flexão $f_{ct,fm}$ para cada grupo de concreto ensaiado, oriundos da Tabela 2. Ressalta-se que estes valores médios foram resultados de ensaios realizados em 5 corpos de prova.

Tabela 2: Quantidade de material empregado por volume de concreto

Material	Quantidade em kg/m^3 Concreto Projetado		
	CP-SF	CP-0,25F	CP-0,50F
Cimento	500	500	500
Areia	808	808	808
Brita	707	707	707
Água	249	249	249
Fibra	0,0	2,3	4,6
Plastificante	3,7	3,7	3,7



Figura 6: Abatimento do tronco de conde do concreto sem fibras

Com relação aos valores de $f_{ct,fm}$ do concreto com fibra de poliolefina de 50 mm de comprimento, verificou-se da Figura 7 que estes valores aumentaram em relação ao valor de $f_{ct,fm}$ do concreto sem fibras. Os ganhos foram cerca de 26%, para $V_f = 0,25\%$, e 33%, para $V_f = 0,50\%$. O valor de $f_{ct,fm}$, para o concreto com $V_f = 0,50\%$, foi em torno de 6% superior ao do concreto com $V_f = 0,25\%$.

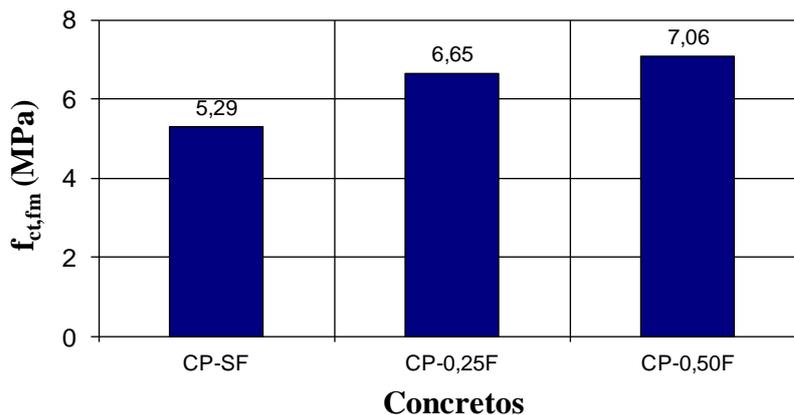


Figura 7: Valores médios de resistência à tração na flexão para cada grupo de concreto

De acordo com Morgan (1996), concretos projetados para túneis devem apresentar aos 28 dias resistência à tração na flexão de no mínimo 6 MPa. Este requisito foi atendido para os concretos projetados com a fibra de poliolefina ensaiados neste trabalho ($f_{ct,fm}$ variou entre 6,65 MPa e 7,06 MPa).

A Figura 8 apresenta as curvas médias carga - flecha dos concretos projetados sem ou com fibra de poliolefina de 50 mm de comprimento.

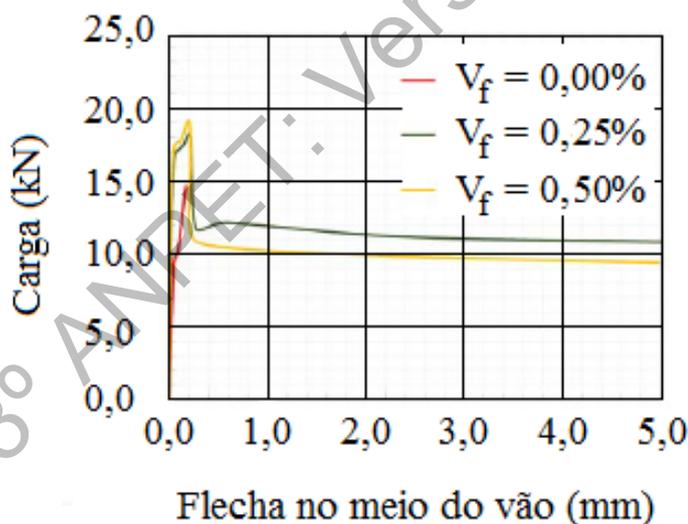


Figura 8: Curvas carga – flecha para cada grupo de concreto

Nas curvas carga - flecha dos concretos, nota-se a carga na qual ocorreu a fissuração do concreto, cujos valores foram cerca de 14,7 kN, para o concreto sem fibras, 18,5 kN, para o concreto com $V_f = 0,25\%$, e 19,6 kN, para o concreto com $V_f = 0,50\%$.

Constata-se das curvas carga - flecha sem fibras que só ocorreu a formação de um ramo ascendente e flechas últimas próximas de 0,2 mm de tamanho, o que mostra o comportamento frágil do concreto sem fibras. Em contrapartida, nas curvas carga - flecha dos concretos com fibras, há a ocorrência de um pico e um ramo descendente (pós-pico) e flechas últimas cerca de pelo menos 25 vezes o valor da flecha última dos concretos sem fibras, o que aponta um comportamento muito menos frágil que o do concreto sem fibras.

A queda de carga pós-fissuração dos concretos com fibras $V_f = 0,50\%$ foi maior que a dos concretos com fibras $V_f = 0,25\%$, em torno dos 8 MPa e 6 MPa.

Os concretos com fibras de 50 mm de comprimento apresentaram, para carga máxima, valores de flecha na faixa de 0,2 mm de tamanho. Depois da sua ruptura, as cargas residuais tenderam a permanecer constantes, tanto para os concretos com fibras $V_f = 0,25\%$ quanto para os com fibras $V_f = 0,50\%$.

A Tabela 3 agrupa os valores de resistência de primeira fissura f_1 , de resistências residuais f_{600}^h e f_{150}^h nas flechas $l/600$ (0,6 mm) e $l/150$ (2,4 mm), de tenacidade T_{150}^h até o valor de flecha igual a $l/150$ (2,4 mm) e de coeficiente de resistência à flexão equivalente $R_{T,150}^h$, obtidos a partir das curvas carga - flecha no meio do vão (v. Figura 8) para os concretos projetados ensaiados com fibra de poliolefina de 50 mm de comprimento e $V_f = 0,25\%$ e $0,50\%$.

A carga de primeira fissura adotada foi 90% da carga máxima para os concretos com fibra, pois é difícil encontrar na curva carga-flecha a carga referente à primeira fissura do concreto com fibras.

Tabela 3: Parâmetros de tenacidade (ASTM C1609, 2010) para os concretos com fibra

Corpo de prova	f_1 (MPa)	f_{600}^h (MPa)	f_{150}^h (MPa)	T_{150}^h (kN.mm)	$R_{T,150}^h$
Concreto $V_f = 0,25\%$	6,00	4,32	3,96	28,2	0,71
Concreto $V_f = 0,50\%$	6,35	3,78	3,56	26,7	0,63

O valor da resistência de primeira fissura f_1 do concreto com $V_f = 0,50\%$ foi cerca de 6% superior ao do concreto com $V_f = 0,25\%$.

Em contrapartida, verifica-se da Tabela 3 que as resistências residuais para as flechas $l/600$ e $l/150$ (f_{600}^h e f_{150}^h) dos concretos com fibras $V_f = 0,25\%$ foram cerca de 14% e 11% superiores que as dos concretos com fibras $V_f = 0,50\%$. Isto aponta que os concretos com fibras $V_f = 0,25\%$ conseguiram suportar maiores cargas residuais em flechas maiores que os concretos com fibras $V_f = 0,50\%$.

Os valores de tenacidade T_{150}^h e de coeficiente de resistência à flexão equivalente $R_{T,150}^h$ para os concretos com $V_f = 0,25\%$ foram em torno de 6% e 13% maiores que os para os concretos com $V_f = 0,50\%$, o que mostra que o teor volumétrico de fibras de 0,25% é próximo do valor ótimo para o concreto dosado em termos de tenacidade.

Os valores de resistência à tração na flexão do concreto com fibra ou módulo de ruptura à flexão (σ_b), de tenacidade à flexão que corresponde à área total sob a curva carga - flecha até a flecha δ_{tb} igual a $l/150$ (T_b) e de fator de tenacidade à flexão (σ_b^-), obtidos a partir das curvas carga - flecha no meio do vão para os concretos com fibras de poliolefina de 50 mm de comprimento e $V_f = 0,25\%$ e $0,50\%$, podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de tenacidade (JSCE-SF4, 1984) para os concretos com fibra

Corpo de prova	σ_b (MPa)	T_b (kNmm)	$\bar{\sigma}_b$ (MPa)
Concreto $V_f = 0,25\%$	6,65	28,2	4,23
Concreto $V_f = 0,50\%$	7,06	26,7	4,01

Verifica-se que os valores de resistência σ_b cresceram com o aumento do teor volumétrico de fibras de 0,25% para 0,50% cerca de 6%. Por conta disto, pode-se concluir que a adição de fibras de poliolefina de 0,25% para 0,50% no concreto pouco influenciou sua resistência à tração na flexão.

O valor de tenacidade T_b dos concretos com $V_f = 0,25\%$ foi maior que o dos concretos com $V_f = 0,50\%$, o que mostra que a adição de fibra de poliolefina no teor volumétrico de 0,25% conduziu à maior capacidade de absorção de energia.

Comportamento similar aos valores de tenacidade T_b foi observado nos valores do fator de tenacidade $\bar{\sigma}_b$ dos concretos com fibras, que foram maiores para os concretos com $V_f = 0,25\%$. O fator de tenacidade $\bar{\sigma}_b$, que é a relação entre T_b e δ_{tb} , expressa a carga média referente à área sob a curva carga - flecha entre o intervalo de flecha de 0 a δ_{tb} . Logo, o gasto de energia para que o concreto com $V_f = 0,25\%$ sofra fissuração foi maior que o do concreto com $V_f = 0,50\%$.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tratou de um estudo para avaliar os parâmetros de tenacidade à flexão de um concreto projetado sem ou com fibras de poliolefina, cujas características e propriedades se mostram adequadas para uso em túneis construídos segundo a metodologia NATM.

Executaram-se três composições de concreto ($f_c = 40$ MPa), tendo sido variado em cada composição do concreto o seu teor volumétrico de fibras de poliolefina ($V_f = 0\%$, $V_f = 0,25\%$ e $V_f = 0,50\%$). De posse dos resultados de ensaios de flexão simples, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- os valores de $f_{ct,fm}$ dos concretos aumentaram com o aumento de V_f em até cerca de 33% para os concretos projetados;
- a adição de fibras de poliolefina nos concretos conduziu ao aumento das suas ductilidade e tenacidade;
- logo após a ruptura no ensaio de tração na flexão, os concretos com fibra apresentaram resistência residual praticamente constante;
- as normas utilizadas para cálculo dos parâmetros de tenacidade à flexão, apesar de tratarem sobre concretos com fibras de aço, serviram para avaliar de maneira satisfatória o desempenho de tenacidade à flexão dos concretos analisados nesta pesquisa; e
- a fibra de poliolefina pode ser uma boa opção para o emprego em concreto projetado para obras de revestimento em túneis, nas quais se deseja maior ductilidade, tenacidade e controle de fissuração de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM C1018 (1997) *Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (Using Beam with Third-Point Loading)*, American Society For Testing Materials Philadelphia, 1997.

- ASTM C1399 (2010) *Standard test method for obtaining average residual-strength of fiber reinforced concrete*, American Society For Testing Materials Philadelphia, 2010.
- ASTM, C1609 (2010). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*, American Society For Testing Materials Philadelphia, 2010.
- ABNT (1991) *NBR 12142 - Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2012) *NBR 1307 -. Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concretos projetados*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- EFNARC (1996) *European Specification for Sprayed Concrete – Guidelines for specifiers and contractors*. European Federation Of National Associations Representing For Concrete Surrey, UK,.
- Islam. S. T. (2012) Study of Same Parameters Affecting the Measured Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete. Master Thesis. *The Faculty of Graduate Studies (Civil Engineering)*, The University of British Columbia.
- JSCE-SF4 (1984) *Method of Tests For Flexural Strength and Flexural Toughness Of Steel Fiber Reinforced Concrete*, Japan Society Of Civil Engineers Japan, 1984.
- Salvador. R. P. (2012) Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras. *Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*.
- Santana, C. S. A. (2017) Propriedades de concretos projetados com fibras de poliolefina para túneis. *Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil*, pp. 141.
- Gasparim, J. C. (2007) Concreto projetado elaborado com cimentos especiais: análise segundo parâmetros de durabilidade. *Dissertação de Mestrado. Engenharia de Construção Civil e Urbana, EPUSP*.
- Prudêncio JR, L. R. (2005) Concreto projetado. *CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações*. IBRACON, v. 02 pp. 1228-1257.
- Morgan, D. R.; Rich, L. D. (1996) Polyolefin fibre reinforced wet-mix Shotcrete. *Sprayed Concrete Technology. International Conference on Sprayed Concrete/Shotcrete*. Loughborough, 1996.
- Amaral, G. A.; Verçosa, J. C. de Q.; Lopes, J. L. A.; Pereira, L. A. de M. (1980). Etapas básicas a serem seguidas na elaboração do projeto de túneis. *Projeto Especial de fim de Curso. Instituto Militar de Engenharia*. 151 pp.
- Campanhã, C. A.; Boscov, P. (1998) Túneis em terrenos pouco consistentes. *Manual Técnico*, CBPO. 111 pp. São Paulo,.
- Hoek, E.; Kaiser, P. K.; Bawden, W. F. (1995) Support of Underground Excavations in Hard Rock. *Mining Research Directorate*, 225 pp.

Claudeny Simone Alves Santana (cl_deny@yahoo.com.br)
Luiz antonio Vieira Carneiro (luizcarneiro@id.uff.br)
Ana Maria Abreu JorgeTeixeira (amam@ime.edu.br)
Diretoria de Fiscalização de Obras Públicas de Engenharia, Tribunal de Contas do PI.
Av. Pedro Freitas, 2100 - Centro Administrativo - Teresina-PI