ALTERNATIVA PARA O CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO COM FIBRAS DE VIDRO PARA PAREDES MACIÇAS DE CONCRETO

MANZIONE, Joelma A. P. (1); REAL, Ligia V. (2); FIGUEIREDO, Antonio D. de (3)

MONTE, Renata (4)

(1) Mestranda, Mestrado Profissional em Inovação na Construção Civil, Universidade de São Paulo, jmanzioni@usp.br

(2) Doutoranda, PPGEC-USP, Universidade de São Paulo, ligiavr@usp.br

(3) Professor Associado, Universidade de São Paulo, antonio.figueiredo@usp.br

(4) Pesquisadora Dra., Universidade de São Paulo, renata.monte@usp.br

Resumo: *O uso de fibras no concreto proporciona o aumento da sua ductilidade e resistência pós-fissuração. No Brasil, o Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT) apresentou recentemente diretrizes para avaliação técnica de paredes estruturais de concreto com fibras de vidro (CRFV). Os critérios propostos para controle tecnológico seguem a tendência mundial de utilizar os parâmetros do ensaio de flexão três pontos com entalhe (3PBT), como preconizado pelo fib Model Code 2010 e pela prática recomendada do IBRACON/ABECE. Como se trata de um ensaio que demanda capacitação laboratorial especializada, ambos os documentos permitem a utilização de ensaio alternativo, desde que haja correlação com o ensaio de referência. Assim, o objetivo desse artigo é apresentar uma alternativa para o controle tecnológico do CRFV para paredes maciças de concreto baseado no estabelecimento de correlações prévias entre os ensaios flexão de vigas com entalhe e de duplo puncionamento. Para isto uma campanha experimental utilizando os dois ensaios, uma matriz de concreto e três teores de macrofibra de vidro foi realizada. Os resultados mostram a excelente correlação que pode ser obtida entre os ensaios, podendo ser adotado o ensaio DPT como alternativa para controle tecnológico do CRFV.*

Palavras-chave: *Ensaio de flexão, ensaio de duplo puncionamento, concreto com fibras, fibra de vidro, controle tecnológico.*

Abstract: *The use of fibers in concrete increases the material ductility and post-cracking strength. In Brazil, the National System of Technical Assessments (SINAT) recently presented guidelines for the technical evaluation of glass fiber reinforced concrete (GFRC) structural walls. The proposed criteria for technological control follows the worldwide tendency of using the parameters of the three-point notched bending test (3PBT), as recommended by the fib Model Code 2010 and the IBRACON/ABECE practice guidance. However, this test demands complex and expensive closed-loop equipment. Alternatively, other test methods may be applied if a correlation with the reference method is provided. Thus, the objective of this paper is to present an alternative for the technological control of GFRC for concrete walls based on the establishment of previous correlations between the 3PBT and double punch test (DPT). For this, an experimental campaign were performed using those two tests, one concrete matrix and three glass macrofiber contents. The results show the excellent correlation that can be obtained between these tests. So, the DPT can be adopted as an alternative test for the technological control of the GFRC.*

Keywords: *Flexural test, double punch test, fiber reinforced concrete, glass fiber, quality control.*

Área do Conhecimento: *Engenharia Civil – Materiais e componentes de construção*

1 INTRODUÇÃO

O concreto reforçado com fibras (CRF) tem sido utilizado com o intuito reduzir a fragilidade e evitar a ruptura brusca do material. As fibras agem como pontes de transferência de tensão através das fissuras, possibilitando que o concreto apresente maiores deformações no regime elástico, bem como tenha maior capacidade de carga pós-fissuração.

No Brasil, o CRF tem sido aplicado principalmente em elementos que possuem a capacidade de redistribuição de esforços, como os pisos industriais e o concreto projetado (FIGUEIREDO, 2011). Apesar de ainda não haver normalização nacional para dimensionamento de estruturas e controle tecnológico do material, em 2017 o Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT) apresentou diretrizes para avaliação técnica de paredes estruturais de concreto com fibras de vidro (CRFV).

Os critérios para controle tecnológico do CRFV apresentados pela Diretriz do SINAT (2017) são similares aos propostos pelo manual de boas práticas de projeto publicados por IBRACON/ABECE (2016), que por sua vez, segue a mesma filosofia do código modelo europeu (*fib Model Code 2010*, 2013). Esses documentos propõem a utilização do ensaio prescrito pela europeia EN 14651 (2007) e na prática recomendada de controle do CRF (IBRACON/ABECE, 2017) de flexão de vigas com entalhe para determinação dos parâmetros de projeto e controle tecnológico do CRFV. Esse método de ensaio prevê a utilização de máquinas de ensaio com sistema fechado (*closed-loop*), ou seja, deve haver um sistema de retroalimentação com taxa constante de deformação do corpo de prova (SIMÃO *et al.*, 2017). Esse tipo de controle possibilita que o ensaio seja mais estável no pós-fissuração da matriz (GOPALARATNAM, GETTU, 1995), garantindo maior confiabilidade dos resultados. Porém, para a realização de ensaios com este tipo de sistema é necessária a utilização de prensas mais caras e sofisticadas. Por isso, tanto o *fib Model Code 2010* (2013) quanto a prática recomendada para o controle do CRF (IBRACON/ABECE, 2017) permitem a utilização de métodos de ensaio alternativos, desde que haja correlação com os resultados obtidos nos ensaios de flexão de referência.

O ensaio de duplo puncionamento, apresentado na prática recomendada para o controle do CRF (IBRACON/ABECE, 2017), tem sido considerado uma promissora alternativa tecnológica, pois permite a utilização de corpos de prova cilíndricos de dimensões menores que as vigas utilizadas no ensaio de flexão. Isso permite, inclusive, a extração de testemunhos de estruturas existentes. Além disso, a possibilidade de utilizar ensaios mais simples favorece um controle tecnológico mais amplo e eficaz, utilizando o ensaio de flexão para uma parametrização inicial do comportamento do material e verificações pontuais de manutenção desse comportamento.

Como mencionado anteriormente, as fibras de vidro já vêm sendo utilizadas nacionalmente para a produção de paredes estruturais, apoiadas pela Diretriz do SINAT (2017). Entretanto, o ensaio indicado para o controle tecnológico é complexo, tornando o custo do controle elevado e de difícil acesso. Nesse contexto, o objetivo deste artigo é apresentar uma alternativa para o controle tecnológico do CRFV para paredes maciças de concreto baseado no estabelecimento de correlações prévias entre os ensaios flexão de vigas com entalhe e de duplo puncionamento.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização da matriz

O programa experimental adotou uma matriz de concreto com três teores distintos de fibra: 3,8, 7,6 e 11,5 kg/m³. No Quadro 1 está apresentada a matriz de concreto utilizada, projetada para alcançar uma resistência a compressão característica de 35 MPa.

Quadro 1 – Composição do concreto utilizado - valores para 1 m³

Cimento CPV -ARI	Areia Fina MF ≤ 2,2	Areia Grossa MF ≥ 2,6	Brita 1 12,5 mm	Brita 2 19 mm	Água	Superplastificante
394 kg	134 kg	536 kg	532 kg	532 kg	193 kg	0,394 kg

Fonte: Os autores (2019).

A fibra de vidro utilizada foi CEM FIL Minibars™ (Figura 1) de comprimento 43 mm e demais características apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2: Características da macrofibra informadas pelo fabricante

Características	Minibar
Comprimento [mm]	43
Diâmetro [mm]	0,70
Fator de forma	não declarado
Densidade específica [g/cm³]	2,00 ±0,1
Módulo de elasticidade [GPa]	42
Resistencia à tração [MPa]	> 1000

Fonte: Os autores (2019).

Figura 1 – Macrofibra Minibar®.



2.2 Ensaios de tração na flexão e de duplo puncionamento

Para os ensaios de flexão, descrito na prática recomendada para o controle do CRF (IBRACON/ABECE, 2017), foram moldados quatro corpos de prova prismáticos de 150x150x550 mm para cada teor de fibra (Figura 2a). Os ensaios foram realizados em máquina servo-controlada Instron, Modelo 5569. Os ensaios de duplo puncionamento, denominado DPT, foram realizados em seis corpos de prova de com a relação diâmetro/altura aproximadamente igual a 1, obtidos pelo corte na metade da altura de três corpos de prova de Ø 150 x 300 mm de altura, para cada teor de fibra. O procedimento de ensaio para o DPT também está apresentado na prática recomendada para o controle do CRF (IBRACON/ABECE, 2017) com a aplicação de velocidade de deslocamento de 0,5 mm/mim (Figura 2b).

Figura 2 – a) Corpo de prova posicionado para o ensaio de flexão 3PBT; b) corpo de prova posicionado para o ensaio de duplo puncionamento DPT.



(a) **(b)**

Fonte: Os autores (2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio de flexão em três pontos com entalhe (3PBT)

Os valores médios de resistência à tração e resistências residuais e os respectivos coeficientes de variação são apresentados na Quadro 3.

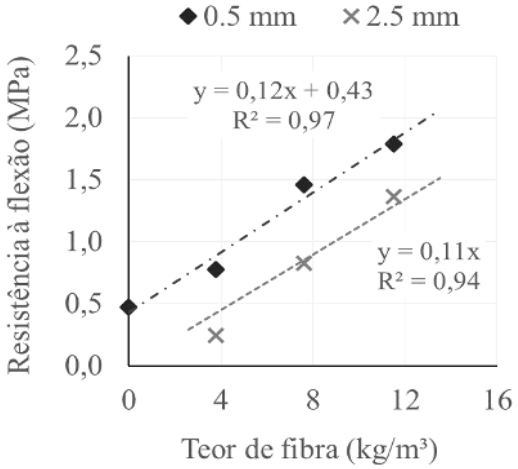
É possível observar no Quadro 3 que a maior influência das fibras ocorre no comportamento pós-fissuração. Verifica-se também que os maiores coeficientes de variação foram obtidos para FR3 e FR4 (CMOD iguais a 2,5 mm e 3,5 mm). Isto ocorre porque as resistências residuais são menores nestes níveis de abertura de fissura e o desvio padrão se mantém praticamente constante. A Diretriz SINAT para uso de CRFV em paredes de concreto indica valores para o Limite de proporcionalidade médio (f_{Lm}) entre 3,8 MPa e 4,2 MPa. Apenas o menor teor da macrofibra de vidro (3,8 kg/m³) ficou no limite superior, estando os demais teores superiores a esses valores de referência. Isto pode ser atribuído a resistência da matriz utilizada de 35 MPa que deve ser superior a referência estabelecida na Diretriz.

Quadro 3 - Resultados médios de resistência à tração e residuais no ensaio de flexão.

Teor de fibra (kg/m³)	Resistências médias (MPa) e coeficientes de variação (%)				
	F_L	F_{R1}	F_{R2}	F_{R3}	F_{R4}
3,8	4,16	0,78	0,36	0,25	0,19
	11%	12%	5%	19%	25%
7,6	4,59	1,46	1,05	0,83	0,64
	7%	11%	13%	17%	21%
11,5	4,43	1,79	1,53	1,37	1,15
	13%	12%	14%	14%	17%

Os resultados apresentados na Figura 3 mostram as relações obtidas entre as resistências médias calculadas para valores de 0,5 mm e 2,5 mm de abertura de fissura e os teores de fibra adotados.

Figura 3 – Resistências médias residuais na flexão versus teor de fibra.



Fonte: Os autores (2019).

Analisando a Figura 3 observa-se relações lineares entre as resistências médias medidas em 0,5 e 2,5 mm de abertura de fissura e o teor de fibra. Em ambos os casos, os coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 0,94. Além disso, percebe-se que o concreto simples apresentou uma pequena resistência residual para 0,5 mm de abertura de fissura (F_{R1m} = 0,472), mas não obteve resultado para 2,5 mm. Consequentemente, a curva referente ao F_{R3m} encontra a origem, enquanto que para F_{R1m} o valor para o concreto simples foi utilizado para obter a correlação. Isto permite estimar a resistência residual para abertura de fissuras de 0,5 mm para adição de teores de fibra inferiores a 3,8 kg/m³. Para o tipo de fibra e matriz de concreto utilizado nesse estudo os parâmetros de resistências residuais indicados na diretriz SINAT ($F_{R1m} \geq 1,5$ MPa e $F_{R3m} \geq 1,0$ MPa) são obtidos para um teor de fibras de 9 kg/m³.

3.2 Ensaio de duplo puncionamento (DPT)

Os resultados médios das cargas relevantes do ensaio DPT são apresentados na Quadro 4, com o respectivo coeficiente de variação.

Quadro 4 - Resultados médios e coeficientes de variação (%) para ensaio de duplo puncionamento.

Teor de fibra (kg/m³)	Cargas relevantes (kN)				
	P_f	$P_{0,5}$	$P_{1,5}$	$P_{2,5}$	$P_{3,5}$
3,8	126,7	19,9	4,7	2,3	1,5
	10%	36%	22%	21%	31%
7,6	125,5	35,7	13,2	7,3	4,3
	12%	23%	41%	49%	61%
11,5	129,9	57,0	22,3	12,7	8,1
	7%	14%	13%	20%	18%

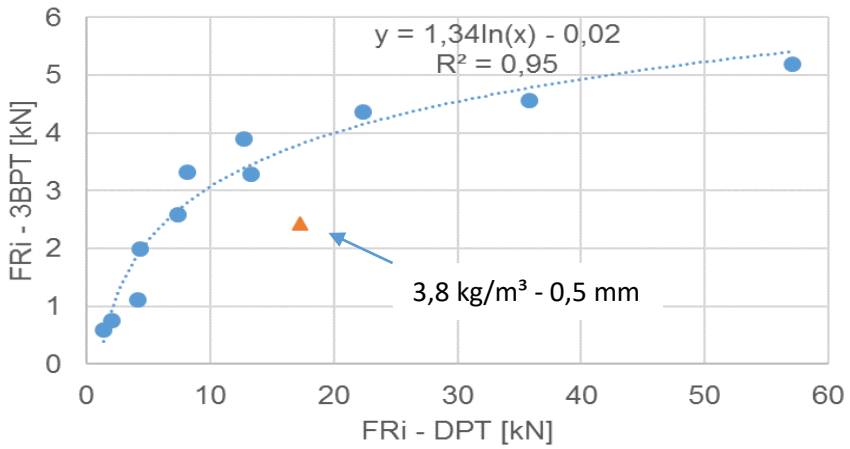
Fonte: Os autores (2019).

Os coeficientes de variação foram obtidos para as cargas de fissuração P_f, entre 7% e 12%. As cargas residuais apresentaram coeficiente de variação entre 13% e 61%, sendo os maiores coeficientes de variação associados às maiores aberturas de fissura ($P_{2,5}$ e $P_{3,5}$). Os resultados de resistência residual aumentam com o acréscimo no teor de fibra. Isto é um importante quando se considera o duplo puncionamento como ensaio de controle de qualidade para o concreto com fibras.

3.3 Correlações ensaio de flexão com duplo puncionamento

As cargas residuais obtidas experimentalmente com os ensaios de flexão (3PBT) e duplo puncionamento (DPT) foram correlacionadas, considerando os valores de deslocamento axial para duplo puncionamento e abertura de fissura para flexão variando de 0,5 mm a 3,5 mm, conforme apresenta a Figura 4.

Figura 4 - Correlação dos resultados de flexão e duplo puncionamento.



Fonte: Os autores (2019).

Os resultados apresentados na Figura 4 expressam a excelente correlação entre os resultados experimentais das cargas residuais obtidos com o 3PBT e DPT, para os diferentes níveis de abertura de fissura e teores de fibra de vidro avaliadas. Os estabelecimentos de uma correlação única para todas as aberturas de fissura resultariam um coeficiente de determinação R^2 um pouco inferior, igual a 0,88. No entanto, eliminando-se a abertura de fissura de 0,5 mm para o teor de fibras 3,8 kg/m³ (destacado na Figura 4), o coeficiente aumenta para 0,95. Isto deve-se a presença de instabilidade pós-fissuração no ensaio de duplo puncionamento que é mais acentuada em compósitos de com menor quantidade de reforço e para menores níveis de abertura de fissura (SIMÃO et al., 2019). O elevado coeficiente de determinação (R^2) demonstra a possibilidade de correlação direta dos ensaios para um determinado compósito. Tais correlações obtidas são experimentais e podem ser geradas na fase de estudo de dosagem da fibra para obter as correlações que serão consideradas durante o processo de controle tecnológico. Dessa forma, o

projetista pode verificar os valores correspondentes do ensaio de flexão de posse dos resultados de controle com o ensaio de duplo puncionamento.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposto correlacionar os resultados de ensaios de flexão (3PBT) e de duplo puncionamento (DPT) para CRFV, para subsidiar a adoção do DPT para que o controle tecnológico de paredes de concreto com fibras de vidro. Com os resultados obtidos nesse estudo as seguintes considerações podem ser apontadas:

- O ensaio 3PBT permite estabelecer curvas de dosagem para resistências residuais de 0,5 mm (ELS) e 2,5 mm (ELU), com coeficientes de determinação R^2 elevados. Para a matriz de concreto (fck ≅ 35 MPa) e tipo de macrofibra de vidro utilizadas nesse estudo, os parâmetros de resistências residuais indicados na diretriz SINAT para uso em paredes de concreto (F_{R1m} ≥ 1,5 MPa e F_{R3m} ≥ 1,0 MPa) são obtidos para um teor de fibras de 9 kg/m³. É importante ressaltar de a Diretriz indica esses valores como referência para a dosagem do CRFV em seções com presença de tensões de tração, torção e tensões tangenciais em geral.
- No ensaio DPT a dispersão dos resultados foi maior quando comparado com 3PBT, especialmente para os maiores deslocamentos verticais. A carga de fissuração não foi influenciada pelo teor de fibra adicionado, mas as cargas residuais aumentaram com o acréscimo no teor de fibra, como esperado e desejado para que o ensaio possa diferenciar o comportamento do CRFV.
- As correlações experimentais entre os ensaios de 3PBT e DPT demostraram claramente a possibilidade de relacionar diretamente os resultados dos ensaios para um determinado compósito. Essas correlações podem ser geradas na fase de estudo de dosagem para a matriz e fibra especificada em projeto. Com isso, um controle tecnológico mais amplo pode ser realizado com o ensaio DPT e as premissas de projeto podem ser verificadas pelo projetista com as equações de correspondência com o ensaio de flexão.

5 AGRADECIMENTOS

A autora Ligia V. Real agradece o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6 REFERÊNCIAS

Diretriz SINAT No. 001 – Revisão 3 –Diretriz para Avaliação Técnica de paredes estruturais de concreto moldadas no local. Ministério das Cidades – Secretaria Nacional da Habitação. Brasília, fevereiro de 2017.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON - Fib. Model Code for Concrete Structures 2010. Switzerland, 2013. 402p.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras. 2011. 248p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GOPALARATNAM, V. S., GETTU, R. On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. Cement and Concrete Composites, v. 17, n.3, p. 239-254, 1995.versidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Prática recomendada IBRACON/ABECE. Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras. São Paulo. Ed. IBRACON/ABECE, 1ª Edição, 2016. 39p.

Prática recomendada IBRACON/ABECE. Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras. Ed. IBRACON/ABECE, 1ª Edição, 2017. 31p.

SIMAO, L. et al. Avaliação do ensaio Barcelona em sistema fechado. In: 59o. Congresso Brasileiro do Concreto, 2017, Bento Gonçalves. O concreto para a retomada do desenvolvimento da infraestrutura nacional. Anais...São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

SIMÃO, L. et al. Influence of the instability of the double punch test on the post-crack response of fiber-reinforced concrete. Construction and Building Materials, v. 217, p. 185-192, 2019.