



Influência da configuração dos roletes na resistência residual de concreto reforçado com fibras

Influence of support roller configuration on the residual strength of fiber-reinforced concrete

Dimas A. S. Rambo (1); Ramoel Serafini (2); Renan P. Salvador (3); Stefany A. Coronel (4); Antonio D. Figueiredo (5); Flávio A. Silva (6)

(1) Professor Doutor, Universidade São Judas Tadeu

(2) Professor Doutor, Universidade São Judas Tadeu

(3) Professor Doutor, PROLAB Engenharia de Construção

(4) Engenheira, Universidade São Judas Tadeu

(5) Professor Doutor, Universidade de São Paulo

(6) (5) Professor Doutor, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rua Dias Leme, 323, Mooca, São Paulo, SP - renan.salvador@prolab.eng.br

Resumo

Dentre os diversos métodos utilizados para a caracterização do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras, podem ser citados os propostos pelas normas ASTM C1609, EN 14651 e ABNT NBR 16940. Os três procedimentos prescrevem ensaios de flexão de corpos de prova prismáticos para determinação da resistência residual pós-fissuração. A norma ASTM C1609 prescreve o ensaio de flexão em 4 pontos, enquanto as normas EN 14651 e ABNT NBR 16940 prescrevem o ensaio de flexão em 3 pontos. Em todas as normas, há recomendações sobre a configuração dos roletes de apoio e de aplicação de carga, que podem divergir dependendo do tipo e da marca do equipamento utilizado para ensaio. Nesse sentido, este trabalho apresenta uma pesquisa realizada sobre a influência da configuração dos roletes sobre a resistência residual de concretos reforçados com fibras. Os resultados mostraram que a configuração dos roletes de apoio pode influenciar em até 25% os valores das resistências residuais.

Palavra-Chave: Concreto reforçado com fibras, resistência residual, roletes de apoio.

Abstract

Among the various methods used to characterize the mechanical behavior of fiber-reinforced concrete, those proposed by ASTM C1609, EN 14651 and ABNT NBR 16940 standards may be used. The three procedures prescribe flexural tests of prismatic specimens to determine post-cracking residual strength. The ASTM C1609 standard prescribes the 4-point bending test, while the EN 14651 and ABNT NBR 16940 standards prescribe the 3-point bending test. All standards have recommendations on the configuration of the support and load application rollers, which may differ depending on the type and brand of equipment used for testing. In this context, this work presents the results of research conducted on the influence of roller configuration on the residual strength of fiber-reinforced concrete. Results showed that the support roller configuration may influence the values of residual strength by up to 25%

Keywords: Fiber-reinforced concrete, residual strength, support roller.



1 Introdução

A avaliação do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras é de extrema importância para que esse compósito seja utilizado de maneira eficiente e econômica. Algumas propriedades podem ser medidas por métodos utilizados para concreto simples, como a resistência à compressão. Entretanto, as propriedades conferidas pela utilização de fibras devem ser avaliadas por métodos de ensaios específicos, a partir da determinação da resistência residual do compósito (BENTUR; MINDESS, 2019).

Diversos ensaios foram desenvolvidos para caracterizar a resistência residual de concretos reforçados com fibras (ABNT, 2021a; ABNT, 2021b; ASTM, 2019; ASTM, 2020; UNE, 2007). Os ensaios de flexão de corpos de prova prismáticos são os mais populares porque simulam as condições em muitas situações práticas. Entretanto, os resultados obtidos nesses ensaios são influenciados pela configuração da máquina de ensaios (FIGUEIREDO, 2011).

A norma ABNT NBR 16940 (2021b) especifica que os roletes de apoio devem rotacionar livremente ao redor do próprio eixo e um deles deve rotacionar no plano perpendicular ao eixo longitudinal do corpo de prova. Entretanto, essa configuração não é definida claramente em outras normativas (AENOR, 2007). Além disso, equipamentos capazes de realizar o ensaio de flexão prescrito pela ABNT NBR 16940 (2021b) podem não conter o sistema de roletes adequados.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da configuração dos roletes de apoio na determinação das resistências residuais de concretos reforçados com fibras. A partir deste estudo, é possível oferecer informações importantes para os profissionais que atuam no segmento de concreto reforçado com fibras, de forma a contribuir para a correta caracterização do desempenho mecânico do material.

2 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é avaliar a influência da configuração dos roletes de apoio na determinação das resistências residuais de concretos reforçados com fibras, segundo a norma ABNT NBR 16940 (2021b).

3 Metodologia experimental

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para o estudo estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais utilizados no estudo.

Material	Tipo
Cimento	CP V ARI RS
Agregado miúdo	Areia natural fina e pó de pedra
Agregado graúdo	Brita granítica (pedrisco e brita 1)
Água	Rede pública de abastecimento
Aditivo dispersante	Superplastificante composto por éter de policarboxilato
Fibra	Macrofibra polimérica

3.2 Dosagem e preparação de concreto

A dosagem do concreto utilizado neste estudo está descrita na Tabela 2. Esse concreto foi dosado baseando-se em composições empregadas em pisos industriais. A relação água/cimento foi igual a 0,52, o teor de argamassa seca igual a 52% e o $f_{ck,28}$ igual a 30



MPa. Os agregados foram utilizados na condição seca. O consumo de fibras foi de 5,0 kg/m³.

Tabela 2 – Dosagem do concreto.

Material	Dosagem (kg/m ³)
Cimento	355,0
Areia natural	562,0
Pó de pedra	241,0
Pedrisco	213,0
Brita 1	853,0
Água	183,0
Superplastificante	3,2
Macrofibra polimérica	5,0

Dois lotes de 140 L de concreto foram produzidos em uma betoneira estacionária de 400 L de capacidade. O processo de mistura consistiu em 6 passos, de acordo com a norma NBR 12655 (ABNT, 2015a), descritos subseqüentemente.

- Adição do agregado graúdo e 1/3 da quantidade de água e mistura por 1 min.
- Adição do cimento e 1/3 da quantidade de água e mistura por 1 min.
- Adição do agregado miúdo e 1/3 da quantidade de água e mistura por 1 min.
- Raspagem da parede interna da betoneira durante 1 min.
- Adição do aditivo dispersante e mistura por 3 min.
- Adição da fibra e mistura por 5 min.

Após a mistura, as propriedades do concreto no estado fresco foram caracterizadas. Então, 10 corpos de prova prismáticos (altura: 150 mm; largura: 150 mm; comprimento: 550 mm) e 6 corpos de prova cilíndricos (altura: 200 mm; diâmetro: 100 mm) foram moldados a partir de cada betonada. Os corpos de prova foram consolidados em mesa vibratória por 20 s, de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2015b). Por fim, os corpos de prova foram desmoldados 24 h após a sua preparação e destinados à cura por imersão em solução saturada de hidróxido de cálcio na temperatura de (23 ± 1) °C.

3.3 Ensaios realizados

A Tabela 3 apresenta os ensaios realizados com os concretos produzidos. A descrição de cada um deles está nos itens 3.3.1 ao 3.3.4.

Tabela 3 – Ensaios realizados.

Ensaio	Amostra	Idade	Referência
Abatimento	Concreto fresco, com e sem fibras	5 min após a mistura	NBR 16889 (ABNT, 2020)
Massa específica	Concreto fresco, sem fibras	5 min após a mistura	NBR 9833 (ABNT, 2008)
Resistência à compressão	Corpos de prova cilíndricos	28 dias	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Resistência à flexão e residual	Corpos de prova prismáticos	28 dias	NBR 16940 (ABNT, 2021b)

3.3.1 Abatimento

O abatimento foi determinado em concreto fresco com e sem fibras utilizando o cone de Abrams, seguindo o procedimento da norma NBR 16889 (ABNT, 2020).



3.3.2 Massa específica

A massa específica foi determinada em concreto fresco sem fibras utilizando um recipiente cilíndrico (volume: 7,8 L), seguindo a norma NBR 9833 (ABNT, 2008).

3.3.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada por ensaios de compressão axial direta realizados em corpos de prova cilíndricos de concreto (altura: 200 mm; diâmetro: 100 mm). A face superior do corpo de prova foi retificada para evitar qualquer irregularidade onde a carga pudesse ser concentrada. Os testes foram realizados em uma máquina universal de ensaios acoplada a uma célula de carga de 1100 kN, com taxa de carregamento igual a 0,45 MPa/min, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018). Foram ensaiados 6 corpos de prova na idade de 28 dias. Todos os corpos de prova foram retirados da cura e retificados com 24 h de antecedência ao ensaio.

3.3.4 Resistência à flexão e residual

As resistências à flexão e residuais foram determinadas por ensaios de flexão em 3 pontos realizados em corpos de prova de concreto prismáticos (altura: 150 mm; largura: 150 mm; comprimento: 550 mm), de acordo com a norma NBR 16940 (ABNT, 2021b). Os ensaios foram realizados em um atuador servo-hidráulico dinâmico com sistema fechado de controle de deformação (*closed-loop*) acoplado a uma célula de carga de 70 kN e com vão de ensaio de 500 mm. Um medidor de deformação (*clip-gage*, precisão: $1,0 \times 10^{-4}$ mm) foi instalado no entalhe (largura: 5 mm; profundidade: 25 mm) dos corpos de prova antes do ensaio.

A taxa de carregamento foi controlada pela taxa de aumento da abertura do entalhe (CMOD) do corpo de prova, que foi definida como 0,05 mm/min até 0,10 mm e 0,20 mm/min além de 0,10 mm. A carga foi aplicada perpendicularmente à superfície de acabamento. Todos os corpos de prova foram retirados da cura e entalhados com 24 h de antecedência ao ensaio.

A partir deste ensaio, uma curva de carga-abertura de entalhe para cada corpo de prova foi obtida. A resistência à flexão (f_{LOP} , pico de resistência) e as resistências residuais para aberturas do entalhe iguais a 0,50, 1,50, 2,50 e 3,50 mm ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, e $f_{R,4}$, respectivamente) foram determinadas usando a Equação 1.

$$f = \frac{3PL}{2bh_{sp}^2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

f: Resistência à flexão ou residual.

P: Carga de pico ou carga residual para aberturas de entalhe iguais a 0,50, 1,50, 2,50 e 3,50 mm.

L: Vão de ensaio.

b: Largura média do corpo de prova na região de fratura.

h_{sp} : Distância média entre o topo do entalhe e a superfície do corpo de prova.

Para este ensaio, foram utilizadas 3 configurações para os roletes de apoio, apresentadas esquematicamente na Figura 1. A primeira delas (Figura 1.a) foi a



configuração prescrita na ABNT NBR 16940 (ABNT, 2021b), na qual os roletes de apoio podem rotacionar livremente ao redor do próprio eixo e um deles pode rotacionar no plano perpendicular ao eixo longitudinal do corpo de prova. A segunda (Figura 1.b) foi com os roletes totalmente travados, ou seja, com qualquer tipo de movimento impedido. A terceira (Figura 1.c) foi definida pela condição totalmente travada, inserindo um filme de politetrafluoretileno entre os roletes e o corpo de prova, para minimizar o atrito entre os dois elementos.

Dos 20 corpos de prova produzidos, 7 foram ensaiados na primeira condição, 7 na segunda e 6 na terceira. A seleção dos corpos de prova para cada configuração foi totalmente aleatória. Todos os ensaios foram realizados aos (28 ± 1) dias de idade.

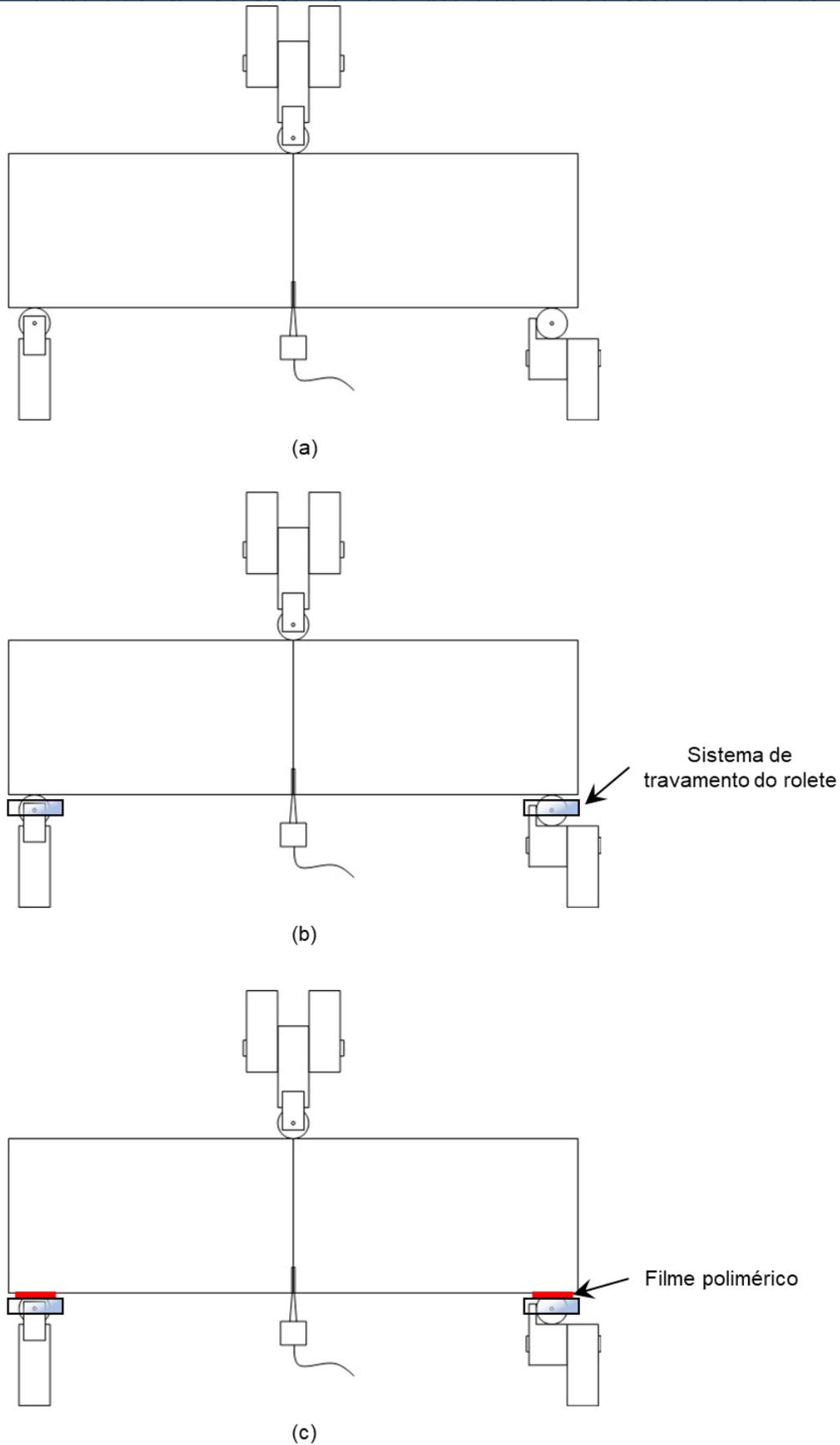


Figura 1 - Configuração dos roletes de apoio: (a) conforme ABNT NBR 16940; (b) totalmente travado; (c) totalmente travado com filme polimérico entre roletes e corpo de prova.



4 Resultados e discussão

4.1 Abatimento e massa específica

Os resultados do abatimento e da massa específica estão apresentados na Tabela 4. Observa-se que os resultados de abatimento e massa específica foram semelhantes para as duas betonadas produzidas, indicando que a preparação do concreto foi similar nas duas preparações.

Tabela 4 – Resultados de abatimento e massa específica.

Ensaio	Betonada 1	Betonada 2
Abatimento sem fibras	180 mm	185 mm
Abatimento com fibras	110 mm	105 mm
Massa específica sem fibras	2385 kg/m ³	2378 kg/m ³

4.2 Resistência à compressão

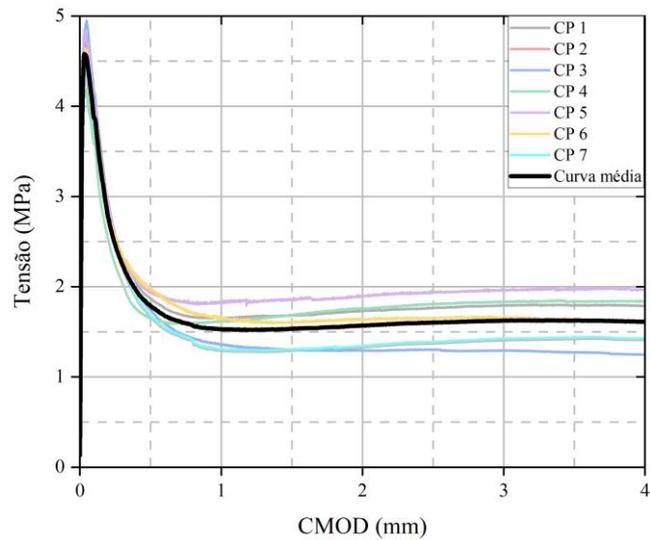
Os resultados de resistência à compressão estão na Tabela 5. Os resultados médios das duas betonadas foram semelhantes, apresentando desvio padrão de 2,3 e 3,2%, o que garante uma condição adequada para comparação dos concretos produzidos.

Tabela 5 – Resultados de resistência à compressão.

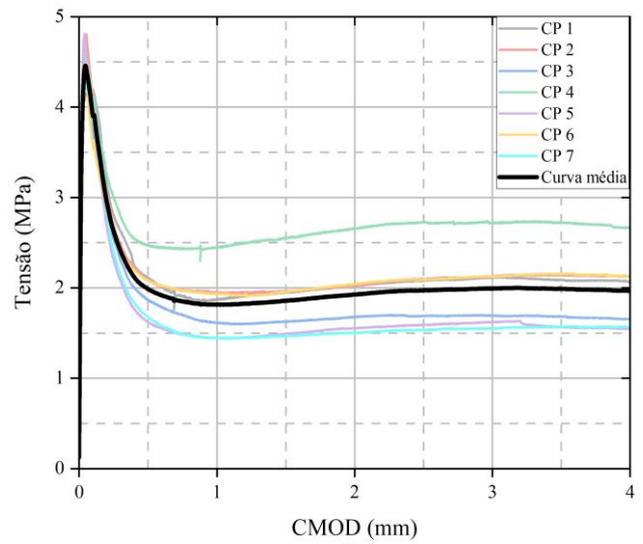
Item	Betonada 1	Betonada 2
$f_{c,m28}$	35,0 MPa	34,8 MPa
Desvio padrão	0,80 MPa	1,1 MPa
Coefficiente de variação	2,3%	3,2%

4.3 Resistência à flexão e residual

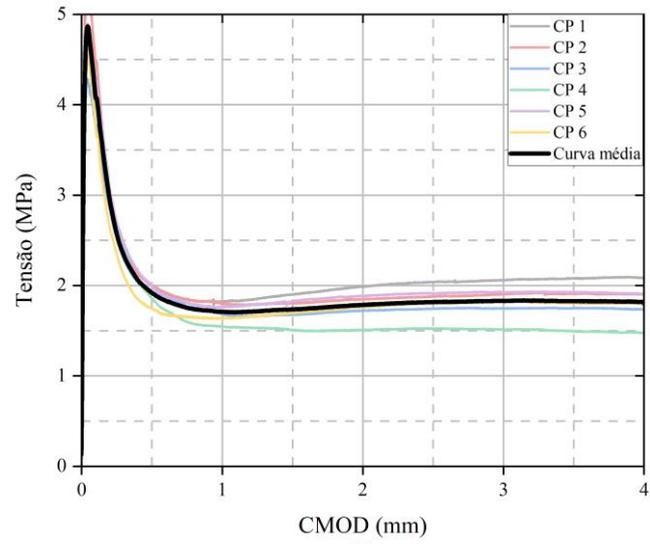
A Figura 2 apresenta as curvas tensão-abertura de fissura para os corpos de prova ensaiados nas com as três configurações dos roletes de apoio. A Figura 3 mostra as curvas médias dos conjuntos de corpos de prova ensaiados em cada condição. Os resultados obtidos a partir da análise das curvas estão na Tabela 6.



(a)



(b)



(c)

Figura 2 - Curvas tensão-abertura de fissura: (a) roletes de apoio conforme ABNT NBR 16940 (2021b); (b) roletes travados; (c) roletes travados e inserção do filme polimérico entre roletes e corpo de prova.

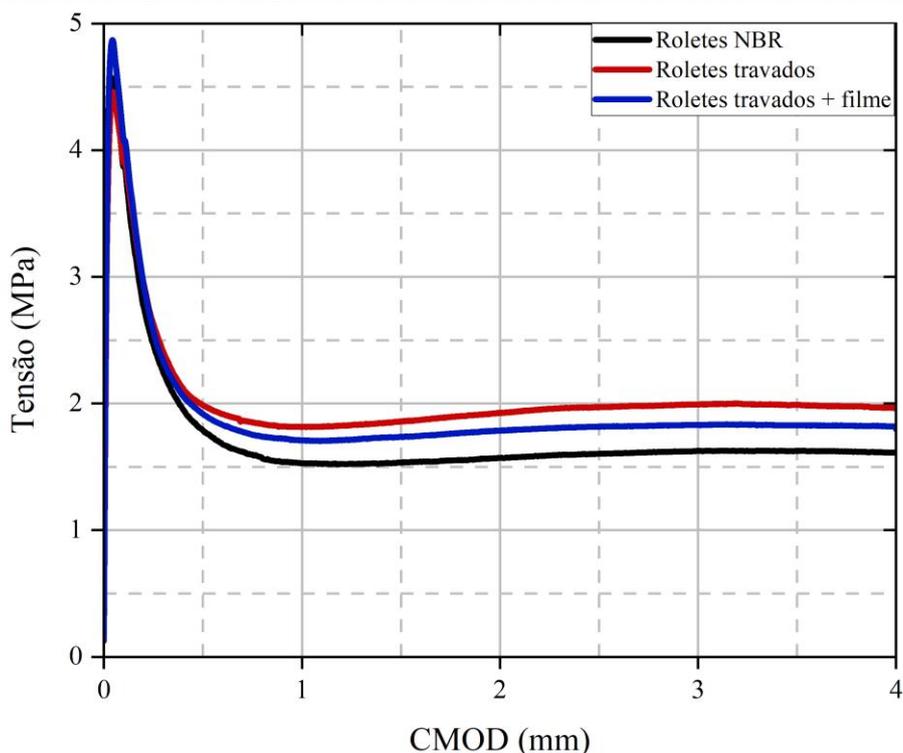


Figura 3 - Curvas médias de tensão-abertura de fissura para as 3 configurações dos roletes analisadas.

Tabela 6 – Resultados de resistência à flexão e residual. Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação obtido para cada valor médio.

Configuração dos roletes	f_{LOP} (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
ABNT NBR 16940 (2021b)	4,65 (5,9%)	1,79 (7,6%)	1,53 (15,1%)	1,60 (15,6%)	1,62 (15,8%)
Travados	4,50 (5,5%)	1,99 (14,6%)	1,86 (20,3%)	1,97 (20,9%)	1,99 (21,0%)
Travados + filme	4,91 (9,5%)	1,92 (5,2%)	1,73 (8,0%)	1,82 (9,6%)	1,83 (10,8%)

Pode-se observar que as resistências pós-fissuração $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$ tiveram aumentos significativos da ordem de 23% para a configuração de roletes travados, em comparação ao procedimento padrão normativo. Já o aumento em $f_{R,1}$ foi de 11%. Um dos fatores de influência sob este incremento é o travamento horizontal do prisma durante o ensaio de flexão, que induz um carregamento de compressão axial durante o ensaio. Isso significa que o travamento dos roletes induz uma tendência de modificação do regime de flexão simples que, é a base de concepção do ensaio normatizado ($N = 0$) para um regime de flexão composta com um pequeno carregamento axial ($N > 0$) (ABNT, 2021b). Dessa forma, pode-se observar que há um incremento do nível de carregamento necessário para uma mesma abertura de fissura e, conseqüentemente, um incremento da resposta do ensaio de flexão na condição com roletes travados (COLLINS; MITCHELL, 1991). Isso denota que a configuração dos roletes modifica a premissa de flexão simples adotada na concepção do ensaio normativo, afetando os resultados do ensaio.

Considerando a configuração dos roletes travados com utilização do filme polimérico, observa-se que o incremento nas resistências residuais, aproximadamente de 13%, é menor devido à mitigação deste efeito de atrito. Mesmo com a redução do atrito no contato, ainda há um incremento das cargas residuais devido à fixação dos roletes, denotando que a redução do atrito não é suficiente para garantir uma equivalência de respostas com o resultado referência.



5 Conclusões

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que:

- Existem diferenças significativas nos valores de resistência residual quando são utilizadas diferentes configurações de roletes de apoio do corpo de prova.
- A utilização de roletes travados modifica o regime de flexão simples para flexão composta, aumentando os valores de resistência residual.
- Embora a utilização do filme polimérico contribua para a redução do atrito entre os roletes e o corpo de prova, esta configuração não é suficiente para garantir uma equivalência de respostas com o resultado referência.

6 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1550**: Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (using centrally loaded round panel). Philadelphia: ASTM, 2020.

_____. **ASTM C1609**: Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). Philadelphia: ASTM, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

_____. **ABNT NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

_____. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **ABNT NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

_____. **ABNT NBR 16939**: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

_____. **ABNT NBR 16940**: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.



BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2nd edition. United Kingdom: CRC Press, 2007.

COLLINS, M. P.; MITCHELL, D. **Prestressed concrete structures**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **UNE EN 14651**: Test method for metallic fiber-reinforced concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). London: UNE, 2007.

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