

EFEITO DA ADIÇÃO DE MICRO E MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO (PP) ÀS FIBRAS DE AÇO SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO

THE EFFECT OF PP MICRO AND MACROFIBERS ADDITION TO STEEL FIBERS ON THE CONCRETE MECHANICAL BEHAVIOR

*Anderson Gobbi Drun¹
Vladimir José Ferrari²*

Resumo: Nessa pesquisa foram analisadas as propriedades no estado fresco e endurecido de um CRF híbrido por meio da associação de microfibras e macrofibras de polipropileno (PP) com fibras de aço. O objetivo foi desenvolver um CRF com boa capacidade de absorção de energia na fase pós-pico do carregamento. Foram analisados cinco grupos de CRF com diferentes teores de fibras. O abatimento do tronco de cone foi utilizado para avaliar as condições de trabalhabilidade das misturas. Foram realizados ensaios em corpos de prova cilíndricos para obtenção da resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e dinâmico. Essa última propriedade obtida pelo ensaio de excitação por impulso. Ensaio de flexão em corpos de prova prismáticos foram realizados utilizando-se um equipamento Instron/Emic visando-se a obtenção das resistências e tenacidade. Os resultados revelaram diminuição significativa nos valores da resistência à compressão e módulo. Os CRFs desenvolvidos apresentaram boa capacidade de carga após a fissuração, as fibras de aço agiram mais eficazmente em baixos níveis de deformação e as fibras de PP tiveram melhor desempenho em maiores níveis de deformação. O comportamento das diferentes fibras em distintos estágios de carregamento, permitiram obter um material com elevada capacidade de absorção de energia quando comparado aquele CRF contendo apenas fibras de aço.

Palavras-chaves: Concreto reforçado com fibras (CRF). Fibra de aço. Hibridização.

Abstract: In this research, the fresh and hardened properties of a hybrid FRC were analyzed by combining polypropylene (PP) microfibrils and macrofibers with long steel fibers. The objective was to develop a FRC with good energy absorption capacity in the post-peak phase of loading. Five CRF groups with different fiber contents were analyzed. The slump test was used to evaluate the working conditions of the mixtures. Tests were performed on cylindrical specimens to obtain the axial compressive strength, static modulus of elasticity and dynamic. This latter property is obtained by testing via impulse excitation technique. Flexural tests in prismatic specimens were performed using an Instron/Emic equipment to obtain the resistances and tenacity. The results showed significant decrease in the values of compressive strength and modulus. The FRCs presented good loading capacity after matrix cracking and the steel fibers acted more effectively at low deformation levels, unlike PP fibers that had better performance at higher deformation levels. The behavior of the different fibers at different loading stages allowed to obtain a material with high energy absorption capacity when compared to FRC containing only steel fibers.

Keywords: *Fiber reinforced concrete (FRC). Steel fibers. Hybridization.*

1 Introdução

O concreto é um excelente material para fins estruturais, porém sua desvantagem está relacionada com sua baixa resistência à tração acompanhada por sua fragilidade devido ao baixo nível de deformação. O CRF vem sendo utilizado com o intuito de reduzir a fragilidade e evitar a ruptura brusca de elementos estruturais. As fibras agem como pontes de transferência de tensões através das fissuras, possibilitando que o concreto apresente maiores deformações na carga de pico, bem como tenha maior capacidade de carga pós-fissuração.

¹Universidade Estadual de Maringá - Brasil, mestrado PCV, email: andergobbi@gmail.com

²Universidade Estadual de Maringá, Brasil, docente do PCV, email: vladimirjf@hotmail.com

A ruptura frágil do concreto simples na tração é caracterizada pela interrupção abrupta da curva tensão-deformação quando do surgimento da primeira fissura (Figura 1). Com a adição de fibras o comportamento do concreto após a primeira fissura é modificado, passando a ser acompanhado por elevada deformação.

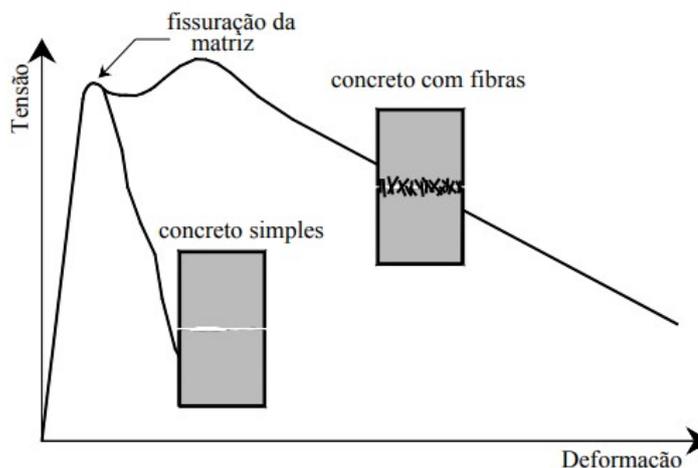


Figura 1. Comportamento à tração do concreto simples e do CRF (Ferrari, 2007)

Com a adição de fibras no concreto há aumento da sua tenacidade e controle da fissuração devido ao efeito de costura promovido pelas fibras ancoradas entre as faces da fissura (abertura e propagação das fissuras ficam restringidas). Um outro aspecto relacionado ao CRF é quanto ao seu comportamento em tração que, segundo o FibModelCode 2010 (2012), pode ser do tipo *hardening* ou *softening*. O primeiro retrata quando o CRF possui uma resistência à flexão superior àquela verificada anterior a fase pós-pico, já o segundo é quando o material possui uma resistência inferior ao registrado na fase pós-pico.

Banthia e Nandakumar (2001) comenta que a hibridização de dois ou mais tipos de fibras racionalmente combinados possui como objetivo produzir um concreto onde o benefício oriundo de cada uma das fibras individuais resulte em uma resposta com sinergia. Pesquisadores (Ahmed e Maalej, 2009), já demonstraram que a hibridização pode resultar em compósitos cimentícios com melhor comportamento em termos de encruamento, resistência e capacidade de deformação em relação ao compósito mono-híbrido.

Kawamata et al. (2003) compartilham a ideia de que as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios de alto desempenho pode ser melhoradas com o uso híbrido de fibras de elevado e de baixo módulo em taxas adequadas à matriz. Zhang et al. (2007), comentam que o processo de hibridização por meio da combinação de fibras de elevado e baixo módulo, promove uma melhora simultânea na resistência à tração e na capacidade de deformação do compósito cimentício.

As vantagens do conceito de hibridização também podem ser aplicadas ao CRF. Qian e Stroeven (2000) comentam que o uso de fibras de forma híbrida é para obter controle da abertura de fissuras em diferentes zonas do concreto (pasta de cimento ou zona de transição entre a pasta e o agregado), em diferentes idades e a diferentes níveis de carga.

Ferrari et al. (2013) verificou melhora acentuada nas resistências, flexão e ao fraturamento, e tenacidade de microconcretos por meio do processo de hibridização de micro e macrofibras de aço.

As fibras poliméricas e as de aço possuem módulo de elasticidade inferior e superior ao do concreto endurecido, respectivamente. Taerwe e Gysel (1996) afirmam que as fibras de aço têm elevado módulo de elasticidade de forma a poder melhorar a tenacidade do concreto.

Já as fibras de PP possuem boa ductilidade e boa capacidade de dispersão de forma a ser possível restringir a fissuração plástica do concreto.

Em algumas pesquisas as macrofibras poliméricas vêm sendo empregadas juntamente com as fibras de aço na produção de concreto com reforço híbrido de fibras, tendo-se o propósito de incrementar as propriedades físicas e mecânicas do material a partir da ação de cada uma das fibras (Cáceres et al., 2013; Dawood and Ramli, 2012).

A partir do conceito de hibridização, em que diferentes fibras podem atuar de maneira conjunta em fases distintas de sollicitação do material cimentício, a pesquisa aqui proposta busca desenvolver um CRF de boa capacidade de absorção de energia (caracterizada por sua Tenacidade flexional) na fase pós-pico do histórico de carregamento. A intenção é, portanto, usar simultaneamente dois tipos de fibras, aço e PP de maneira híbrida numa matriz cimentícia formada por agregado miúdo e graúdo com dimensão máxima característica de 19 mm e resistência à compressão em torno de 30 MPa. O objetivo em aplicar simultaneamente fibras de aço e poliméricas é obter melhor desempenho para o CRF em termos de aumento da resistência à flexão, pós-pico e residual com incremento na tenacidade e capacidade de carga, aproveitando-se das propriedades mecânicas inerentes a cada um dos tipos e comprimentos das fibras.

2 Materiais e Métodos

A pesquisa é desenvolvida para investigar as propriedades no estado fresco e endurecido de CRF por meio da hibridização entre fibras de aço e PP. No estado fresco avaliou-se a consistência da mistura e no estado endurecido foram realizados ensaios para avaliar as propriedades mecânicas do CRF.

2.1 Materiais

Para a produção do CRF de cada grupo utilizou-se cimento Portland CP II Z-32 com resistência à compressão de 32 MPa aos 28 dias de idade, segundo informações do fabricante.

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural fina proveniente da região de Maringá/PR com dimensão máxima característica de 1,18 mm, módulo de finura igual a 1,71 e massa específica de 2,64 g/cm³, conforme caracterização realizada seguindo-se as normas ABNT NBR NM 248 (2003), ABNT NBR NM 52 (2009) e ABNT NBR NM 45 (2006), respectivamente.

O agregado graúdo utilizado foi uma brita número 1 de basalto proveniente da região de Maringá/PR com dimensão máxima característica de 19 mm, módulo de finura igual a 1,93 e massa específica de 2,77 g/cm³, conforme caracterização realizada seguindo-se as normas ABNT NBR NM 248 (2003), ABNT NBR NM 53 (2009) e ABNT NBR NM 45 (2006), respectivamente.

Como aditivo foi utilizado um superplastificante com o objetivo de garantir a mesma consistência do CRF de cada grupo com aquele sem adição de fibras (CRF0). A faixa de dosagem utilizada foi aquela recomendada pelo fabricante, ou seja, entre 0,2 a 1% em relação à massa do cimento.

Foram utilizados três tipos de fibras: aço e duas de PP. As fibras de aço são de 25 mm de comprimento, as microfibras possuem 12 mm de comprimento e as macrofibras de PP são de 54 mm de comprimento. As fibras são mostradas na Figura 2 e as informações, segundo os fabricantes, estão indicadas na Tabela 1.



Figura 2. Fibras de aço e de PP (macro e microfibras).

Tabela 1 – Propriedades das fibras conforme indicações dos fabricantes.

Propriedades	Fibra de Aço	Polipropileno	
		Microfibra	Macrofibra
Forma	Tipo A1 – com ganchos	Multifilamentos	Multifilamentos Retorcidos
Comprimento (mm)	25	12	54
Diâmetro (mm)	0,75	-	0,018
Densidade (g/cm ³)	7,86	0,91	0,91
Resistência à tração (MPa)	1100	300	700 - 750
Módulo de Elasticidade (GPa)	210	3	9

Fonte: Autor (2019).

A matriz do CRF é de um concreto dosado para atingir a resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias de idade. Para tanto, utilizou-se o seguinte traço: 1:1,85:2,77:0,55 (cimento: areia: brita: água/cimento - a/c).

As adições de fibras de aço, microfibra e macrofibra de PP à matriz de concreto foram realizadas conforme as composições indicadas na Tabela 2. O grupo 1 é o de referência do concreto sem fibras para o estabelecimento de comparação e verificação do efeito das fibras sobre a matriz cimentícia. O grupo 2 (CRF2) contendo somente fibras de aço foi idealizado para servir como referência de comparação quando da adição das fibras de PP. O volume adotado de 1% de fibras de aço corresponde aproximadamente ao volume crítico de fibras, representa uma taxa já convencional e estudada em outras pesquisas (Ferrari et al., 2013; Carnio, 2017).

O grupo 3 (formado pelos concretos CRF3.1, CRF3.2 e CRF3.3) foi idealizado para análise da influência da MIPP quando trabalhando em conjunto com as fibras de aço. O grupo 4 (formado pelos concretos CRF4.1, CRF4.2 e CRF4.3) foi idealizado com o objetivo da análise da influência da MAPP quando trabalhando em conjunto com as fibras de aço. Com o grupo 5 (CRF5.1, CRF5.2 e CRF5.3) buscou-se analisar o efeito combinado das fibras de PP (MIPP e MAPP) com as fibras de aço. Para tanto, nesse grupo a taxa de MIPP foi de 0,2% e a de MAPP foi variando-se de 0,3 a 0,5%.

Tabela 2 – Tipo e taxa de fibras dos CRFs.

Grupos	CRF	Tipo e taxa de fibras (em relação ao volume)		
		Aço	Polipropileno	
			Microfibra: MIPP	Macrofibra: MAPP
1	CRF0	0%	0%	0%
2	CRF2	1%	0%	0%
3	CRF3.1	1%	0,2%	0%
	CRF3.2		0,3%	
	CRF3.3		0,4%	
4	CRF4.1	1%	0%	0,3%
	CRF4.2			0,4%
	CRF4.3			0,5%
5	CRF5.1	1%	0,2%	0,3%
	CRF5.2			0,4%
	CRF5.3			0,5%

Fonte: Autor (2019).

2.2 Moldagem dos grupos

A moldagem foi realizada seguindo-se a metodologia indicada na ABNT NBR 12655 (2006), sendo utilizada uma betoneira elétrica com capacidade nominal de 600 litros. O ensaio do abatimento do tronco de cone (Slump Test) foi realizado seguindo-se a metodologia recomendada pela ABNT NBR NM 67 (1998), tendo-se como referencial o valor de 140 ± 20 mm para o Slump. Na Figura 3 mostram-se os ensaios realizados no estado fresco: abatimento do tronco de cone e a determinação da massa específica.

Para cada grupo de CRF foram moldados dez corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) e quatro corpos de prova prismáticos (150 mm x 150 mm x 500 mm). Decorridos 24 horas da moldagem, todos os corpos de prova foram desformados e conduzidos para uma câmara úmida, onde permaneceram por 28 dias numa temperatura controlada de 24°C e umidade superior a 95% (Figura 4).



Figura 3. Ensaio no estado fresco: consistência e massa específica



Figura 4. Corpos de prova após a moldagem e armazenados em câmara úmida

2.3 Ensaio no estado endurecido

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme as recomendações da ABNT NBR 5739 (1994) utilizando-se uma máquina de ensaios Universal com capacidade de 1000 kN, sendo os ensaios conduzidos por meio da aplicação de uma taxa de 0,45 MPa/s.

A determinação do módulo de elasticidade do CRF a partir da resposta acústica de caráter não-destrutivo é uma ferramenta promissora, pois o ensaio pode ser repetido e os resultados comparados ao longo do tempo. Na presente pesquisa teve-se o objetivo de aplicar essa ferramenta de ensaio baseada na resposta acústica para comparação com a ferramenta de ensaio destrutivo já consagrada. Assim, a metodologia para a determinação do módulo de elasticidade foi composta por dois distintos ensaios:

a) Módulo de elasticidade do CRF a partir da resposta acústica: os diferentes grupos de CRF foram excitados por impulso dado aos corpos de prova cilíndricos posicionados por fios nos pontos nodais, no sentido da vibração de interesse e a resposta acústica foi coletada em termos de frequências naturais de vibração, a partir das quais é calculado o módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) como é mostrado na Figura 5. Uma das particularidades do equipamento utilizado está no fato de que a resposta acústica do corpo de prova é capturada empregando-se um captador acústico (microfone), ao invés de um acelerômetro fixado ao corpo de prova. Os ensaios por técnica de excitação por impulso foram realizados seguindo-se as recomendações da ASTM E1876 (2015);

b) Módulo de elasticidade do CRF a partir do ensaio destrutivo realizado conforme as recomendações da ABNT NBR 8522 (2017). Para tanto, utilizou-se uma Máquina de ensaios com capacidade nominal de 600 kN, onde o ensaio foi conduzido a três ciclos sucessivos de carregamento e descarregamento uma taxa de 0,45 MPa/s, conforme mostra a Figura 5.



Figura 5. Determinação do módulo de elasticidade - ensaio não-destrutivo por técnica de excitação por impulso e ensaio convencional destrutivo por compressão axial.

O ensaio de flexão nos corpos de provas prismáticos foi realizado conforme as recomendações da norma JSCE-SF4 (1984) utilizando-se uma Máquina Universal de ensaios com capacidade de 600 kN, conforme mostra a Figura 6.



Figura 6. Ensaio de flexão em corpos de prova prismáticos

3 Resultados e discussões

3.1 Trabalhabilidade das misturas

A Tabela 3 mostra os valores obtidos para o Slump e a massa específica dos diferentes grupos de CRF. Na Figura 7 é possível visualizar a influência da hibridização na redução dos valores do abatimento do tronco de cone. Nos grupos 3, 4 e 5 foi possível retomar a consistência da mistura ao valor de Slump desejado (em torno de 140 mm) quando da incorporação de aditivo.

Tabela 3 - Propriedades do CRF no estado fresco

Grupo	CRF	Abatimento - Slump (mm)		Aditivo* (%)	Massa Específica (g/cm ³)
		Sem aditivo	Com aditivo		
1	CRF0	160	-	0	2,391
2	CRF2	140	-	0	2,432
3	CRF3.1	80	140	0,17	2,464
	CRF3.2	40	140	0,25	2,246
	CRF3.3	40	120	0,45	2,306
4	CRF4.1	100	140	0,20	2,332
	CRF4.2	90	140	0,15	2,387
	CRF4.3	75	140	0,20	2,305
5	CRF5.1	30	125	0,35	2,407
	CRF5.2	30	100	0,55	2,371
	CRF5.3	50	140	0,40	2,195

*Em relação à massa de cimento.

Fonte: Autor (2019).

Ao ser adicionada apenas as fibras de aço (CRF2) pouco alterou-se (20 mm de diminuição no valor do abatimento) a trabalhabilidade da mistura em relação ao CRF0. Quando da hibridização pela adição das MIPP às fibras de aço, a redução nos valores do abatimento passou a ser expressiva, chegando-se ao valor de Slump de apenas 40 mm para os concretos CRF3.2 e CRF3.3 com a hibridização em taxas de 0,3% e 0,4% de MIPP, respectivamente.

A hibridização pela adição das MAPP às fibras de aço também resultou em redução nos valores do abatimento do tronco de cone em relação ao CRF2, porém a diminuição na consistência da mistura observada nos concretos do grupo 4 não foi tão significativa quanto aquela do grupo 3. Quando da hibridização aço + (MIPP e MAPP), grupo 5, as reduções nos valores do abatimento foram ainda mais acentuadas do que aquelas observadas para o grupo 3.

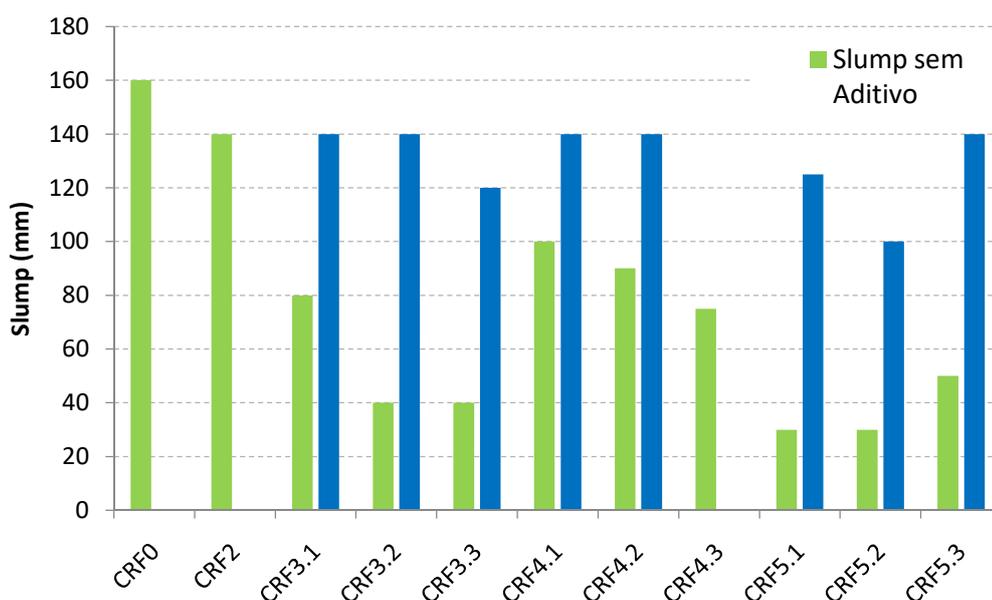


Figura 7. Efeito da hibridização nos valores da consistência das misturas.

3.2 Resistência à compressão e Módulo de elasticidade

Os resultados obtidos para a resistência média à compressão aos 28 dias (f_{cm}), módulo de elasticidade estático (E_c) e dinâmico (E_{cd}) dos diferentes grupos de CRF são indicados na Tabela 4. Os resultados referem-se a média obtida através do ensaio realizado em seis corpos de prova cilíndricos 100 mm x 200 mm. Os valores do desvio padrão são também indicados.

Foi obtido o módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}), utilizando-se a metodologia descrita no item 6.2.3.1 da ABNT NBR 8522 (2017) em que a referida propriedade mecânica equivale ao coeficiente angular da reta secante à curva tensão-deformação passando entre os pontos com tensões iguais a 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura.

Tabela 4 - Resistência à compressão e módulos de elasticidade - valores médios.

Grupos	CRF	f_{cm} (MPa)	f_{cmi}/f_{cm} (%)	E_c (GPa)	E_{ci}/E_c (%)	E_{cd} (GPa)	E_{cdi}/E_{cd} (%)
1	CRF0	31,26 ± 2,47	-	30,65 ± 1,11	-	39,49 ± 1,28	-
2	CRF2	29,64 ± 0,73	-5,18	30,09 ± 2,01	-1,83	37,30 ± 0,64	-5,55
3	CRF3.1	23,21 ± 0,85	-25,75	25,37 ± 2,70	-17,23	33,69 ± 0,81	-14,69
	CRF3.2	22,87 ± 0,76	-26,84	26,95 ± 2,36	-12,07	30,38 ± 0,74	-23,07
	CRF3.3	22,83 ± 0,59	-26,97	24,81 ± 1,33	-19,05	30,26 ± 0,60	-23,37
4	CRF4.1	25,23 ± 2,63	-19,29	25,91 ± 0,06	-15,46	33,16 ± 1,26	-16,03
	CRF4.2	25,63 ± 1,48	-18,01	28,19 ± 1,40	-8,03	33,70 ± 0,11	-14,66
	CRF4.3	24,53 ± 1,18	-21,53	26,72 ± 2,39	-12,82	32,34 ± 1,33	-18,11
5	CRF5.1	29,27 ± 0,86	-6,37	28,05 ± 1,22	-8,48	33,81 ± 0,84	-14,38
	CRF5.2	27,45 ± 1,34	-12,19	27,69 ± 0,79	-9,66	32,54 ± 0,78	-17,60
	CRF5.3	18,05 ± 0,90	-42,26	21,46 ± 1,29	-29,98	26,69 ± 0,98	-32,41

Fonte: Autor (2019).

A adição de fibras de aço ao concreto (CRF2) resultou numa diminuição de 5,18% na resistência à compressão em relação a matriz de concreto sem fibras (CRF0). A adição de MIPP as fibras de aço (grupo 3) resultou numa diminuição ainda mais significativa (em torno de 26%) da resistência à compressão em relação a matriz de concreto sem fibras (CRF0). A adição de MAPP as fibras de aço (grupo 4) resultou em diminuição na resistência à compressão do concreto em relação a matriz sem fibras (CRF0) de 19,29%, 18,01% e 21,53% para o CRF4.1, CRF4.2 e CRF4.3, respectivamente. Entre os concretos hibridizados, o CRF5.1 e o CRF5.2, foram aqueles que sofreram menores reduções, 6,37% e 12,19%, respectivamente, no valor da resistência à compressão.

De maneira geral observou-se que ao inserir fibras ao concreto houve uma diminuição na resistência à compressão para todos os corpos de prova avaliados. Tais resultados corroboram com a literatura existente no sentido de que a incorporação de fibras ao concreto não tem objetivo de aumentar a resistência à compressão do concreto, podendo até diminuir seus valores (FIGUEIREDO, 2000). Oliveira (2018) ao avaliar a incorporação de micro e macrofibras de PP, com mesma dimensão às utilizados nessa pesquisa, observou em todos os casos diminuição da resistência à compressão, fato que vai de acordo aos valores observados nessa pesquisa. Cáceres et. al. (2013) ao avaliar a resistência à compressão de uma

matriz de concreto com adição de fibras de aço e macrofibra de PP não observou mudanças significativas na resistência à compressão, com valores na mesma ordem de grandeza. De certa maneira verificou-se que as fibras possuem uma influência significativa na redução da resistência à compressão dos CRF. Segundo Ferrari (2007) este fato pode estar relacionado com o papel que o volume de fibra exerce na incorporação de ar pela matriz, reduzindo assim a sua resistência.

Na Figura 8 tem-se a comparação entre os valores dos módulos de elasticidade E_c e E_{cd} . O gráfico é apresentado usando-se o formato boxplot em que a dispersão, simetria e o intervalo entre os pontos máximos e mínimos fossem visualizados mais facilmente. Os dados contidos dentro da caixa boxplot correspondem a 50% dos dados amostrais que ficam compreendidos entre o primeiro e o terceiro quartil. O comprimento desses intervalos é proporcional à dispersão entre os dados.

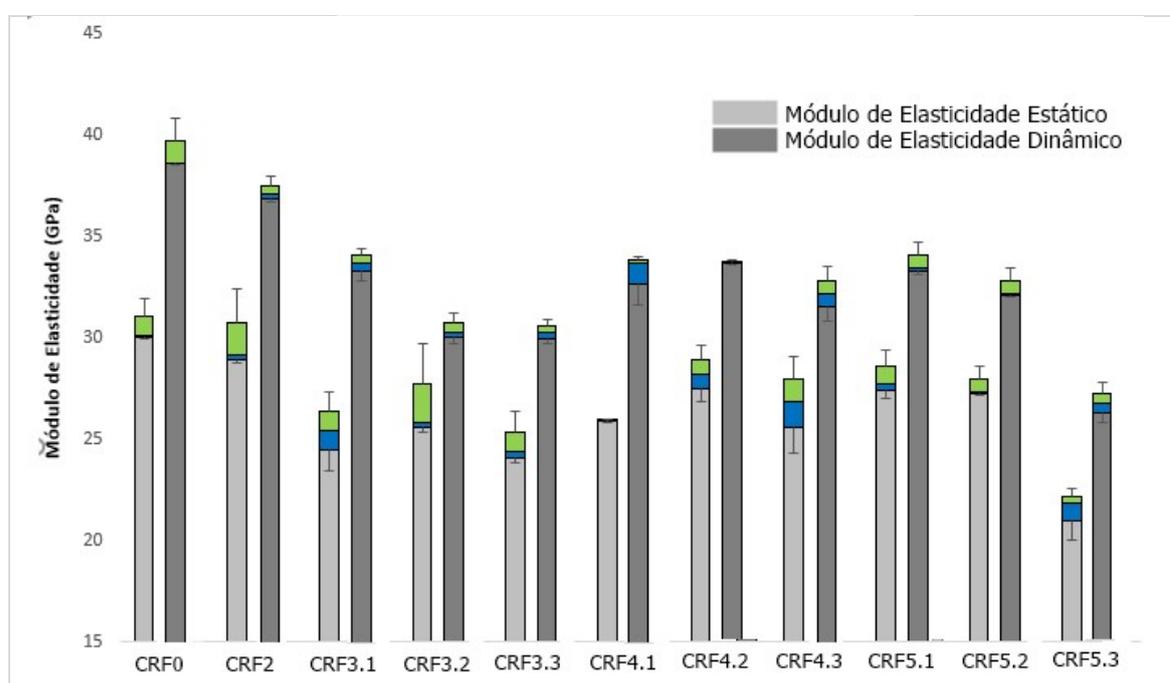


Figura 8. Comparação entre os valores dos módulos de elasticidade.

A análise da variabilidade dos dados (boxplot) mostra que os valores para o módulo de elasticidade estático e dinâmico possuem significativas diferenças. A variabilidade nos resultados foi maior para o módulo estático em relação ao dinâmico. Nesse último os resultados tendem a um comportamento uniforme. Neville (2011) comenta que o ensaio não-destrutivo não provoca microfissuração na matriz, diferente do que ocorre com o ensaio destrutivo para a obtenção do módulo estático.

Assim, como observado nos resultados da resistência à compressão, a mesma tendência foi observada com os resultados do módulo de elasticidade, ou seja, diminuição nos valores quando comparado ao concreto sem fibras (CRF0). Em relação a matriz reforçada apenas com as fibras de aço (CRF2), as reduções nos módulos estático e dinâmico foram pequenas, 1,83% e 5,55%, respectivamente, em relação ao CRF0. Nos grupos 3, 4 e 5 a redução no módulo de elasticidade, estático e dinâmico, foi mais expressiva.

O valor obtido para o E_{cd} do CRF0 foi 29% superior ao E_c , indo ao encontro do que já foi mencionado por Mehta e Monteiro (1994). Segundo os referidos autores, o módulo de elasticidade dinâmico é cerca de 30% maior do que o módulo de elasticidade estático para concretos de média resistência. Ainda para o concreto sem fibras, CRF0, as equações

empíricas (1) e (2), propostas por BS 8110-2 (1985) e Lyndon e Baladran (1986), respectivamente, relacionam os módulos E_c e E_{cd} .

$$E_c = 1,25 \cdot E_{cd} - 19 \quad (1)$$

$$E_c = 0,83 \cdot E_{cd} \quad (2)$$

Como mostrado na Tabela 5, pode-se constatar que a equação 1 fornece uma excelente estimativa do valor do módulo de elasticidade estático a partir do módulo dinâmico. A diferença obtida entre o valor estimado analiticamente e o obtido experimentalmente foi de apenas 1%, sendo os valores, portanto praticamente iguais. Já pela equação 2, o valor estimado foi 7% superior ao valor experimental.

Quando se fala em CRF, há ausência do estabelecimento de relações entre os módulos estático e dinâmico. Neste trabalho, portanto, procurou-se dar uma pequena contribuição nessa linha de pesquisa. Para tanto, apenas para efeito comparativo, as referidas equações foram também utilizadas para estimativa do módulo estático a partir do módulo dinâmico para os CRFs. Além disso, por meio da correlação apresentada na Figura 9 obteve-se a Equação 3, do tipo exponencial com coeficiente de determinação R^2 igual a 0,7684, para estimativa dos valores do módulo estático a partir do dinâmico para os resultados obtidos nesta pesquisa.

$$E_c = 1,1295 \cdot E_{cd}^{0,9074} \quad (3)$$

Tabela 5 - Correlações entre os módulos de elasticidade

Grupos	CRF	Valores experimentais			Valores analíticos do E_c		
		E_c (GPa)	E_{cd} (GPa)	Relação: E_{cd}/E_c	Eq. 1	Eq. 2	Eq. 3
1	CRF0	30,65	39,49	1,29	30,36	32,78	-
2	CRF2	30,09	37,30	1,24	27,63	30,96	27,00
3	CRF3.1	25,37	33,69	1,33	23,11	27,96	27,20
	CRF3.2	26,95	30,38	1,13	18,98	25,22	25,56
	CRF3.3	24,81	30,26	1,22	18,83	25,12	25,46
4	CRF4.1	25,91	33,16	1,28	22,45	27,52	27,06
	CRF4.2	28,19	33,70	1,20	23,13	27,97	27,21
	CRF4.3	26,72	32,34	1,21	21,43	26,84	26,74
5	CRF5.1	28,05	33,81	1,21	23,26	28,06	27,23
	CRF5.2	27,69	32,54	1,18	21,68	27,01	26,83
	CRF5.3	21,46	26,69	1,24	14,36	22,15	21,64

Fonte: Autor (2019).

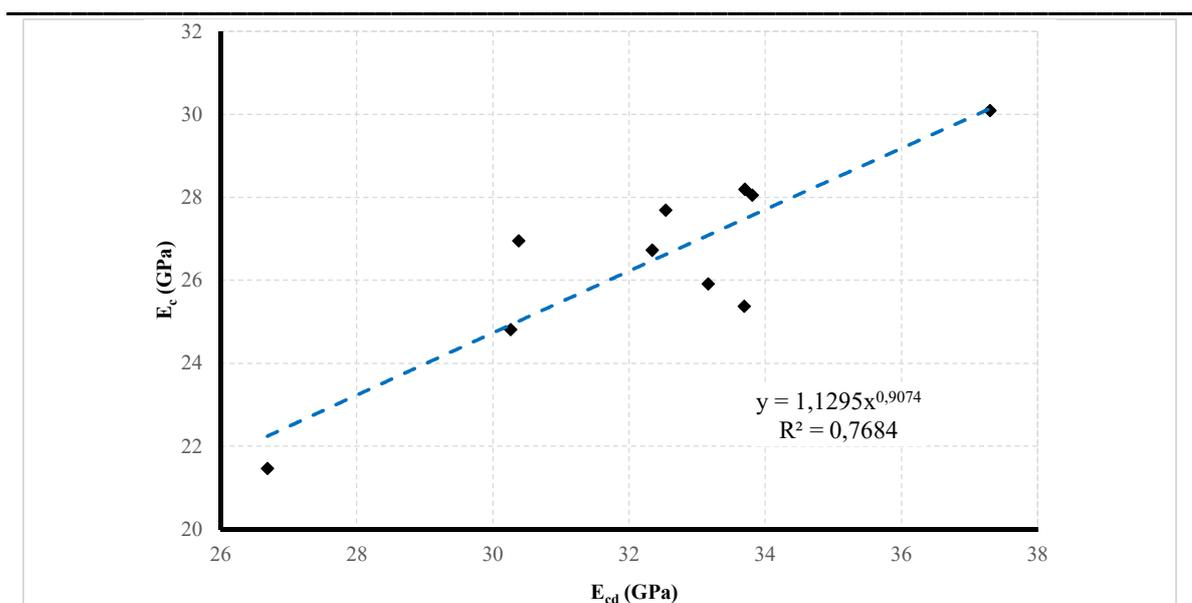


Figura 9. Correlação entre os valores de módulo de elasticidade estático e dinâmico para os CRFs de todos os grupos.

Pela comparação estabelecida na Figura 10, fica evidenciado que a estimativa analítica para os valores do módulo estático é melhor representada através da Equação 3 proposta nesta pesquisa. Para a estimativa do módulo de elasticidade estático a Equação 2 resulta em menores divergências em relação a Equação 1, ao contrário do que ocorre para o concreto sem fibras, onde a Equação 1 apresenta melhor estimativa em relação a Equação 2.

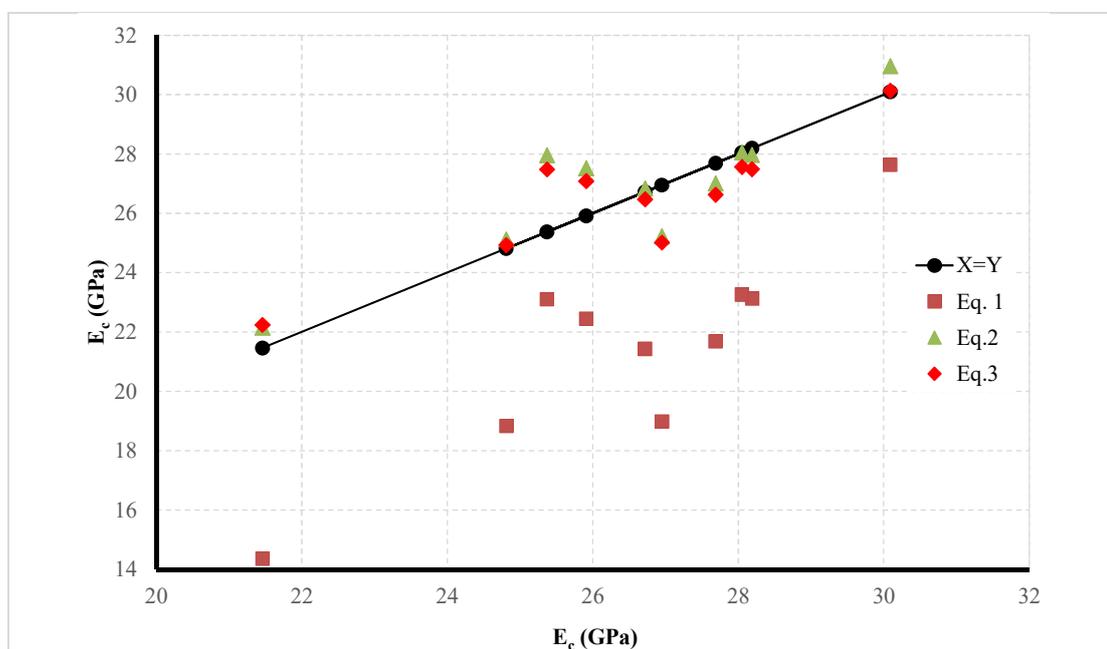


Figura 10. Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e analiticamente

3.3 Resistência à flexão

Na Figura 11 são reunidas as curvas médias de todos os concretos reforçados com fibras. Fica evidenciado, entre todos os concretos reforçados com fibras, o comportamento do

CRF5.1 em termos de ganho de capacidade de carga mesmo após a fissuração e ruptura da matriz. Comportamento semelhante foi também o observado para o CRF5.3, porém em menores níveis de força. Nos demais compósitos, o comportamento ficou caracterizado por curva com ramo descendente após a fissuração da matriz e abaixo da curva representativa do comportamento do CRF2.

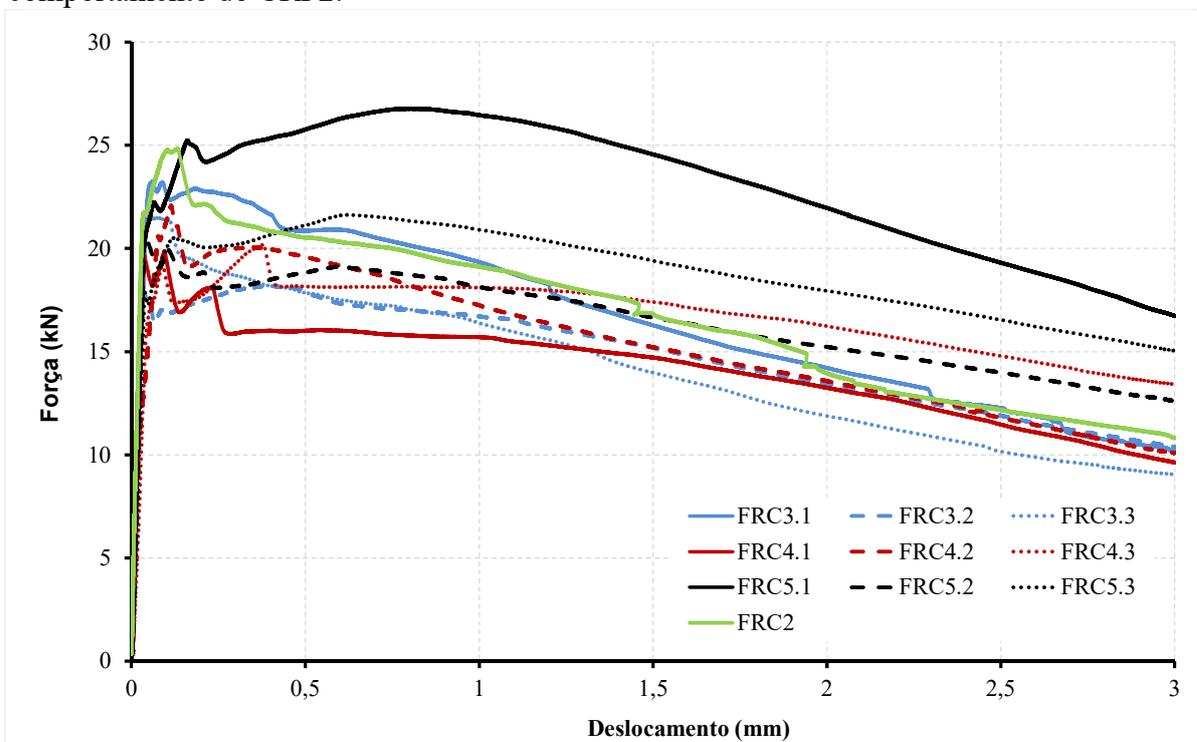


Figura 11. Curvas médias força-deslocamento de todos os grupos.

Na Figura 12 ilustra-se uma curva típica força-deslocamento com a representação dos parâmetros de resistência à flexão (σ_b), resistências residuais ($f_{d,L/600}$ e $f_{d,L/150}$) e fator de tenacidade ($\overline{\sigma}_b$), aqui calculados para caracterizar mecanicamente o comportamento à flexão dos CRFs.

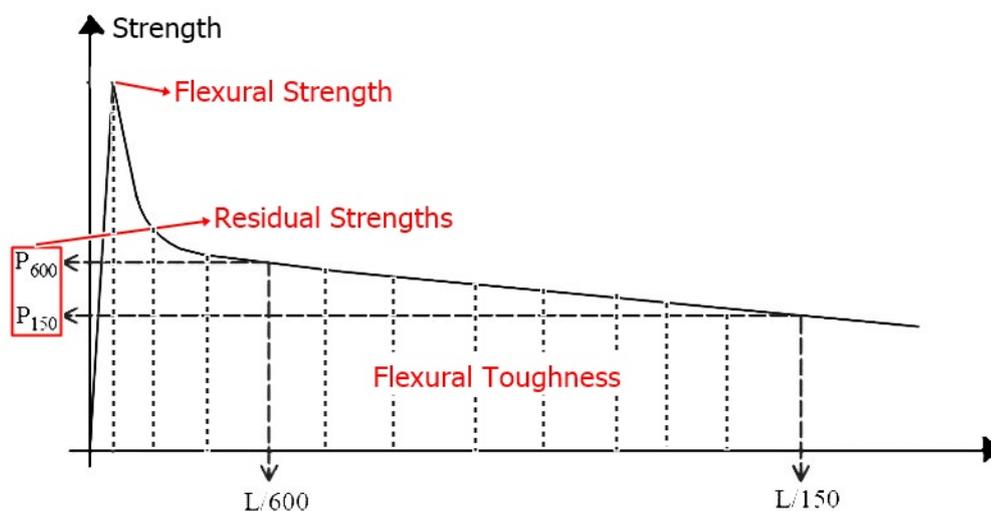


Figura 12. Identificação dos parâmetros de propriedades mecânicas do CRF.

A resistência à flexão (σ_b) foi calculada através da Equação 4 tendo-se como referência o valor da força máxima obtida através da curva P- δ .

$$\sigma_b = \frac{P.L}{b.h^2} \quad (4)$$

Em que:

- P: força máxima (N);
- L: vão livre do corpo de prova (mm);
- b: largura da seção do corpo de prova (mm);
- h: altura da seção do corpo de prova (mm).

O fator de tenacidade flexional ($\overline{\sigma}_b$) é calculado por meio da Equação 5 a partir da determinação da Tenacidade flexional (T_b), compreendida como sendo a área total abaixo da curva força-deslocamento até a deformação equivalente a L/150, ou seja, $\delta_{tb} = 3$ mm.

$$\overline{\sigma}_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{L}{b.h^2} \quad (5)$$

Em que:

- $\overline{\sigma}_b$: fator de tenacidade à flexão (MPa);
- T_b : tenacidade à flexão, compreendida como área abaixo da curva até o limite de L/150 (N.mm);
- δ_{tb} : deslocamento vertical equivalente a L/150 (mm);
- L: vão livre do corpo de prova (mm);
- b: dimensão da base do corpo de prova (mm);
- h: dimensão da altura do corpo de prova (mm).

O conceito de resistência residual foi utilizado como descrito na ASTM C1609 (2019) e calculado através das Equações (6) e (7).

$$f_{d,L/600} = P_{d,L/600} \cdot \frac{L}{b.d^2} \quad (6)$$

$$f_{d,L/150} = P_{d,L/150} \cdot \frac{L}{b.d^2} \quad (7)$$

Onde:

- $f_{d,L/600}$ e $f_{d,L/150}$: resistências residuais correspondentes aos deslocamentos verticais do corpo de prova de L/600 e L/150, respectivamente (MPa);
- $P_{d,L/600}$ e $P_{d,L/150}$: forças residuais correspondentes ao deslocamento vertical do corpo de prova de L/600 e L/150, respectivamente (N);
- L: vão do corpo de prova (mm);
- b: largura do corpo de prova (mm)
- d: altura do corpo de prova (mm)

Na Tabela 6 são reunidos os valores médios da resistência à flexão, fator de tenacidade flexional e resistências residuais.

Na Figura 13 são comparados graficamente os valores da resistência à flexão. Em relação a matriz sem fibras (CRF0) foi observado aumento na resistência à flexão de apenas 8% com a introdução de 1% de fibras de aço (CRF2) e de até 18% quando da hibridização das micro e macrofibras de PP com as fibras de aço (CRF5.1). Para os demais compósitos, a

resistência à flexão da matriz não foi aumentada com a introdução de fibras. Em relação ao CRF2, o aumento na resistência à flexão do CRF5.1 foi de 10%.

Ainda com relação a resistência à flexão, os valores obtidos mostram que a adição de microfibras às fibras de aço reduziu a resistência à flexão do material, sendo o mesmo efeito observado quando da adição de macrofibras de PP às fibras de aço. No entanto, denota-se nos grupos 3 e 4 uma tendência de crescimento da resistência à flexão com o aumento do volume de fibras de PP. O aumento no volume das fibras de PP é possível, visto que os concretos dos grupos 3 e 4 tiveram sua trabalhabilidade assegurada e igual àquela do concreto sem fibras através do uso de aditivo em quantidades inferiores ao limite recomendado pelo fabricante do produto.

Tabela 6 - Valores médios da resistência à flexão, fator de tenacidade flexional e resistências residuais.

Grupos	CRF	Flexão		Tenacidade		Resistência Residual	
		σ_b (MPa)	σ_{bi}/σ_{b1}	$\overline{\sigma_b}$ (MPa)	$\overline{\sigma_{bi}}/\overline{\sigma_{b2}}$	$f_{d,L/600}$ (MPa)	$f_{d,L/150}$ (MPa)
1	CRF0	3,24 ± 0,33	1,00	-	-	-	-
2	CRF2	3,49 ± 0,36	1,08	2,21 ± 0,63	1,00	2,96 ± 1,08	1,44 ± 0,48
3	CRF3.1	2,88 ± 0,96	0,89	1,90 ± 0,82	0,86	2,40 ± 1,09	1,19 ± 0,53
	CRF3.2	2,92 ± 0,56	0,90	1,99 ± 0,73	0,90	2,50 ± 0,55	1,38 ± 0,60
	CRF3.3	3,17 ± 0,41	0,98	1,89 ± 0,74	0,86	2,95 ± 0,36	1,21 ± 0,52
4	CRF4.1	3,04 ± 0,14	0,93	1,88 ± 0,13	0,85	2,69 ± 0,13	1,28 ± 0,06
	CRF4.2	3,05 ± 0,24	0,94	2,04 ± 0,25	0,92	2,57 ± 0,31	1,72 ± 0,54
	CRF4.3	3,07 ± 0,08	0,95	2,23 ± 0,63	1,00	2,75 ± 0,19	1,79 ± 0,66
5	CRF5.1	3,82 ± 0,50	1,18	3,07 ± 0,61	1,39	3,27 ± 0,25	2,23 ± 0,68
	CRF5.2	3,02 ± 0,25	0,93	2,17 ± 0,59	0,98	2,90 ± 0,23	1,68 ± 0,58
	CRF5.3	2,98 ± 0,37	0,92	2,50 ± 0,41	1,13	2,67 ± 0,41	2,01 ± 0,41

Fonte: Autor (2019).

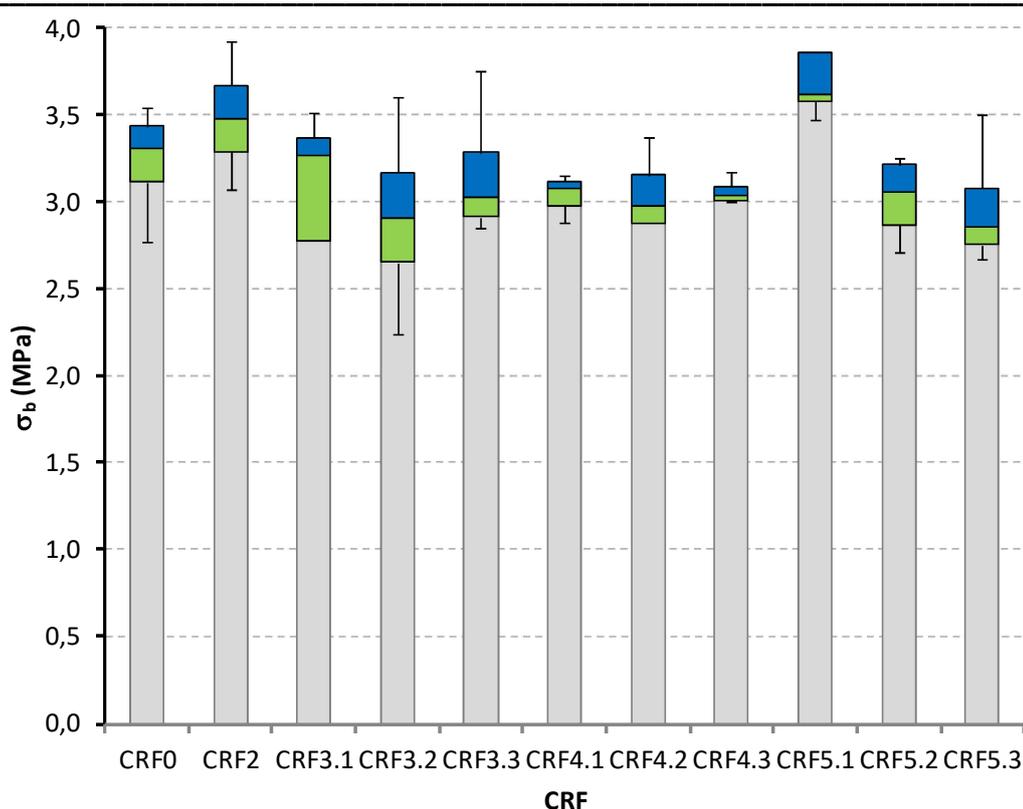


Figura 13. Comparação entre os valores de resistência à flexão (σ_b)

Em relação ao concreto contendo somente fibras de aço (CRF2), a tenacidade foi aumentada em até 39% para o CRF5.1. O ganho de tenacidade observado denota o efeito benéfico da hibridização de micro e macrofibras de PP com as fibras aço, resultando num material com maior capacidade de absorção de energia durante o processo de fissuração e ruptura da matriz de concreto. Um aumento de apenas 13% também foi observado quando da comparação do CRF5.3 com o CRF2. Já nos demais compósitos, o valor da tenacidade ficou abaixo daquele obtido para o CRF2.

Nos concretos do grupo 4, verificou-se uma tendência de crescimento do fator de tenacidade com o aumento do volume de macrofibras de PP.

Na Figura 14 apresenta-se a comparação entre os valores de resistências residuais para os diferentes CRFs, juntamente com a ilustração da dispersão dos resultados.

Os valores de resistências residuais, para a deformação vertical de L/600, dos concretos dos grupos 3 e 4 foram inferiores ao valor obtido para o CRF2. Apenas o CRF3.3 apresentou valor praticamente igual ao obtido para o CRF2. Importante registrar que os valores dessa resistência apresentaram tendência de crescimento com o aumento do volume de microfibras de PP. Para o CRF5.1 observou-se um aumento de 10% no valor da resistência residual quando comparado com o valor obtido para o concreto contendo somente fibras de aço.

Os valores de resistências residuais, para a deformação vertical de L/150, dos concretos do grupo 3 foram inferiores ao valor obtido para o CRF2. Já para os concretos do grupo 4, especificamente o CRF4.2 e CRF4.3, os valores da resistência residual foram superiores ao obtido para o concreto contendo somente fibras de aço. Ficou também evidenciado a tendência de crescimento dessa resistência residual com o aumento do volume de macrofibras.

Logo, como pode ser observado na Figura 15, os valores de resistência residual evidenciam que as macrofibras e as microfibras de PP atuam em estágios distintos do histórico de carregamento, a primeira atua em maiores níveis de deformação e a segunda melhor influencia nos estágios iniciais pós-fissuração da matriz. As microfibras influenciaram para a evolução do crescimento da resistência residual pós-pico para a deformação de L/600, enquanto que, as macrofibras influenciaram a evolução do crescimento da resistência residual para o nível de deformação mais avançado (L/150).

Para a resistência residual mais próxima ao pós-pico, apenas o CRF5.1 superou (em 10%) o valor obtido para o concreto contendo somente fibra de aço (CRF2). Já para o estágio final de comportamento, a resistência residual do CRF2 foi superada por concretos do grupo 4, CRF4.2 e CRF4.3, em 19% e 24%, respectivamente, bem como para os concretos do grupo 5, CRF5.1 e CRF5.3 em até 55% e 40%, respectivamente. Tal constatação denota o desempenho da macrofibra de PP para o estágio final do carregamento do material.

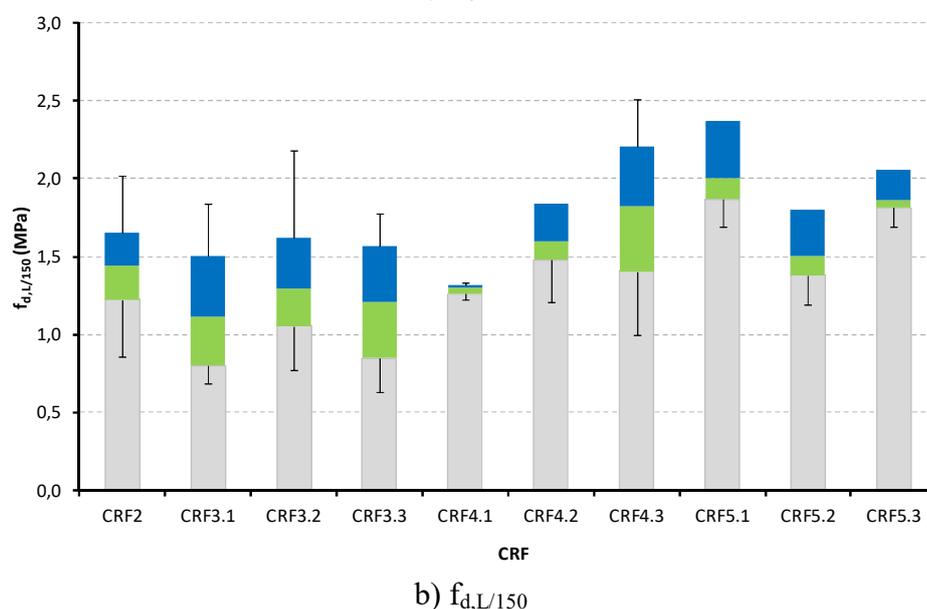
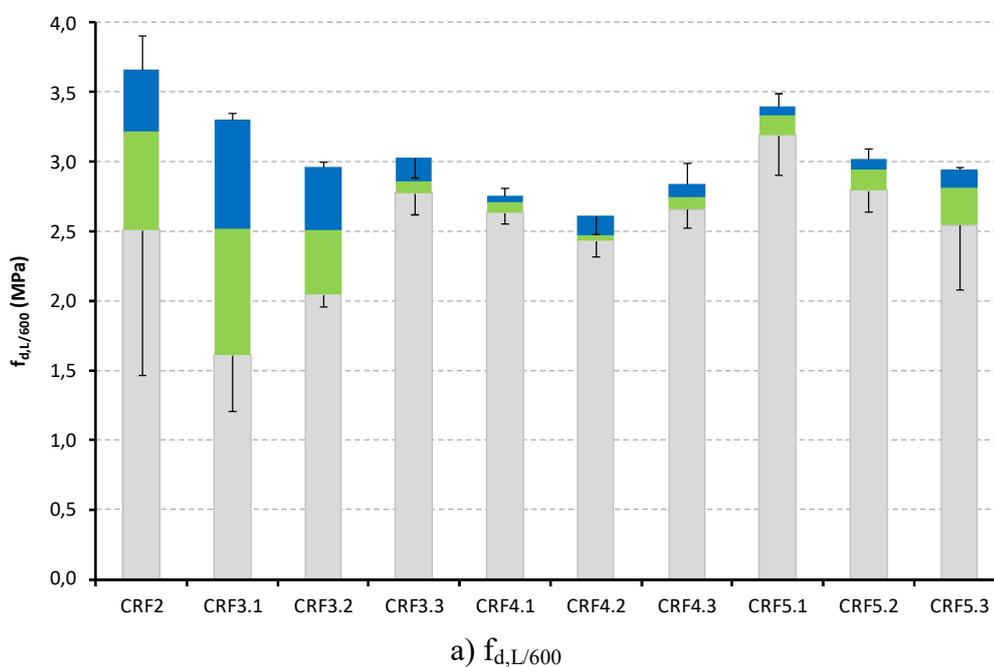


Figura 14. Comparação entre os valores de resistências residuais ($f_{d,L/600}$ e $f_{d,L/150}$)

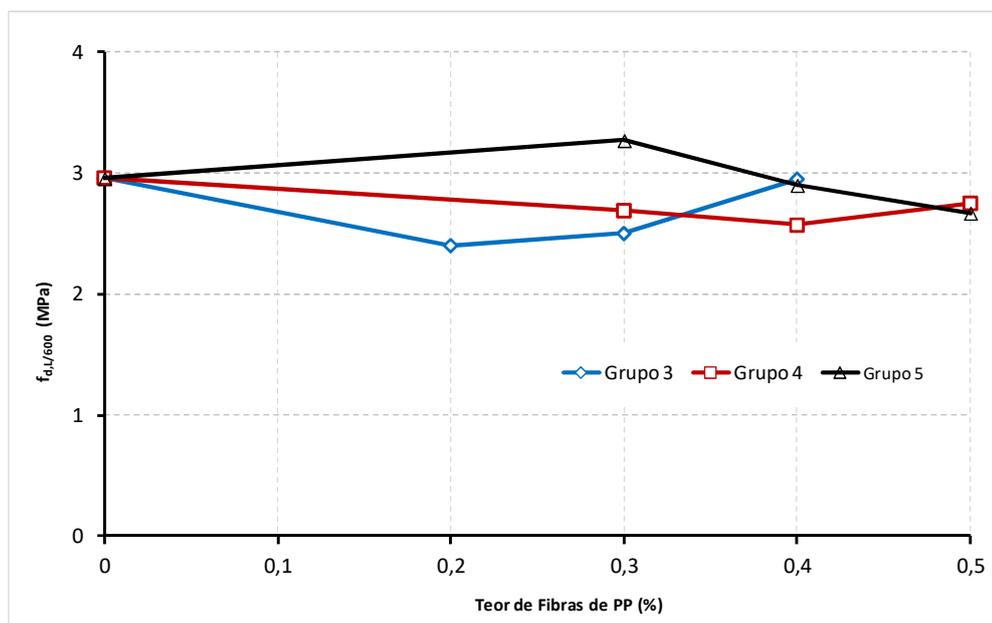
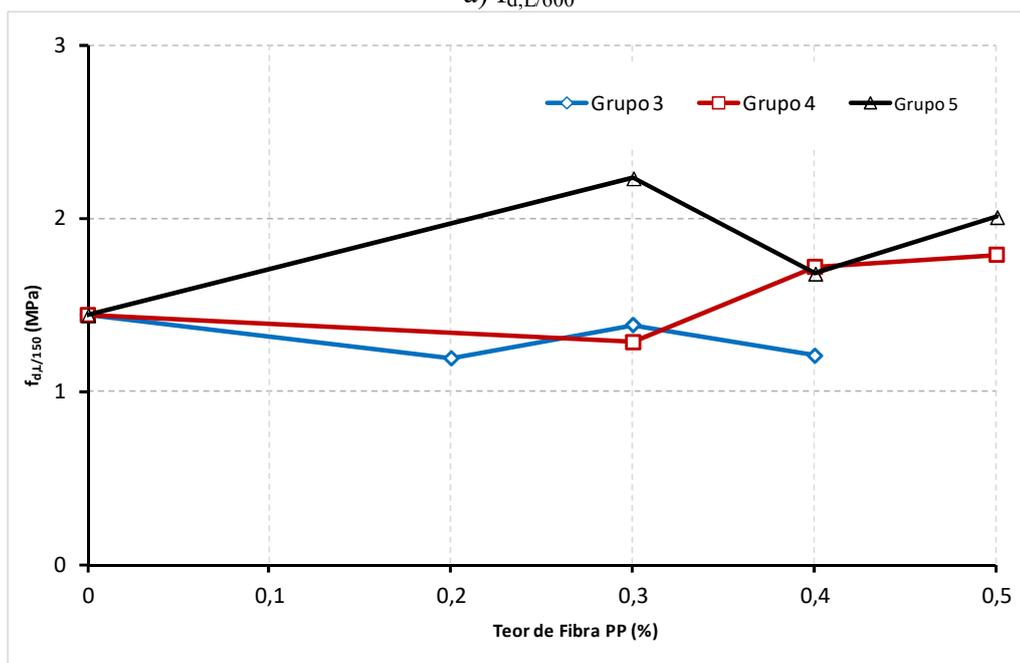
a) $f_{d,L/600}$ b) $f_{d,L/150}$

Figura 15. Influência do teor de fibras de PP nos valores de resistências residuais ($f_{d,L/600}$ e $f_{d,L/150}$).

4 Conclusões

Pela análise dos resultados obtidos, destacam-se como principais conclusões da pesquisa:

- A mobilidade da mistura foi reduzida e a trabalhabilidade foi modificada quando da incorporação das fibras de PP às fibras de aço. Nesses casos, a mobilidade da mistura foi recuperada por meio da adição de aditivo do tipo superplastificante;

- A hibridização aço + MIPP resultou em menor trabalhabilidade para a mistura quando comparada à hibridização com aço + MAPP. As microfibras promoveram uma diminuição maior na trabalhabilidade da mistura em comparação com as macrofibras;
- De todos os concretos estudados, a hibridização pela adição de MIPP e MAPP as fibras de aço foi a que resultou na redução mais significativa da consistência da mistura. As fibras poliméricas atuando em conjunto formam uma estrutura interna semelhante a uma rede que dificulta a fluidez da mistura. Mesmo assim, para as misturas do grupo 5, foi possível retomar a consistência da mistura ao valor de Slump desejado (140 mm);
- Os resultados de Slump denotam que hibridizações (MIPP + MAPP) com taxas de MIPP acima daquela utilizada no grupo 5 não seriam possíveis em termos de consistência da mistura e prejuízo para a trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras;
- De maneira geral observou-se que a inserção de fibras ao concreto resultou em diminuição da resistência à compressão em todos os grupos analisados. A MIPP hibridizada com as fibras de aço foi a que resultou nos maiores valores de redução da resistência à compressão;
- O módulo de elasticidade, estático e dinâmico, acompanhou a tendência de queda nos valores quando da adição de fibras, assim como o efeito observado na resistência à compressão;
- As reduções nos valores dos módulos estático e dinâmico foram pequenas quando da adição apenas de fibras de aço (CRF2). Nos demais grupos, com a adição de macro e microfibras de PP às fibras de aço, a redução nos valores dos módulos foi mais pronunciada;
- O valor obtido para o módulo dinâmico do concreto sem fibras foi 29% superior ao módulo estático, confirmando conceitos já existentes na literatura;
- A formulação analítica proposta pelo código britânico BS 8110-2 fornece uma excelente estimativa do valor do módulo de elasticidade estático a partir do valor obtido através do ensaio dinâmico;
- Para os concretos aqui estudados foi possível obter uma equação do tipo exponencial do grau de determinação de 0,77 ($E_c = 1,1295 \cdot E_{cd}^{0,9074}$) para correlacionar o módulo de elasticidade estático a partir do dinâmico;
- Foi possível desenvolver um CRF (grupo 5 – CRF5.1) com comportamento à flexão caracterizado por hardening, com resistência pós-fissuração superior aquela de ruptura da matriz e efeito foi proporcionado pelo comportamento das fibras atuando em diferentes estágios do carregamento;
- Os valores de resistência residual à flexão evidenciaram que as MAPP e as MIPP atuaram em estágios distintos do histórico de carregamento, sendo as primeiras em maiores níveis de deformação e a segunda nos estágios iniciais logo após a fissuração da matriz;
- Ficou evidenciado na pesquisa que a hibridização resultou num concreto com melhor comportamento em termos de encruamento, resistência e capacidade de deformação em relação ao concreto contendo apenas fibra de aço.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

AHMED, S.F.U.; MAALEJ, M. Tensile strain behavior of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites. **Constructionandbuildingmaterials**, 23, 96-106, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248, Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**, Rio de Janeiro, 2008.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E1876-15:Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. West Conshohocken, PA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1609/C1609M:Standard Test Method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)**. West Conshohocken, 2019.

BANTHIA, N.; NANDAKUMAR, N. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2001.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8110-2: Structural use of concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances**. London, 2001.

CÁCERES, A. R. E.; FIGUEIREDO, A. D.; MONTE, R. **Avaliação do comportamento do concreto com reforço híbrido de fibras**. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto Gramado (RS), 2013.

CÁRNIO, M. A. Aspectos gerais sobre o uso do concreto reforçado com fibras no Brasil: produção, projeto, tecnologia, normalização. **Concreto&Construções**, 87, 2017.

DAWOOD, E. T.; RAMLI, M. Contribution of hybrid fibers on the hybrid fibers on the properties of high strength concrete having high workability. **Science Direct**, 2011.

FERRARI V. J., HANAI, J. B., SOUZA, R. A. Flexural strengthening of reinforcement concrete beams using high performance fiber reinforcement cement-based composite (HPFRCC) and carbon fiber reinforced polymers (CFRP), **Construction and Building Materials**, 48, 485-498, 2013.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. Part III-2**. Concrete Library International. n.3, 58-61, 1984.

KAWAMATA, A.; MIHASHI, H. Fukuyama, H. Properties of hybrid fiber reinforced cement-based composites. **Journal of Advanced Technology**, 1 (3), 283-290, 2003.

LYNDON, F. D.; BALADRAN, R. V. Some observations on elastic properties of plain concrete, **Cement and Concrete Research**, v.16, n.3, p. 314-324, 1986.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed., Editora Pini. São Paulo, 1994.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, Editora Pini. São Paulo, 1982.

OLIVEIRA, T. T. A. de. **Desenvolvimento de um concreto reforçado com fibras (CRF) híbridas de polipropileno**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

QIAN, C; STROEVEN, P. Development of hybrid polypropylene-steel fiber-reinforced concrete. **Cement and Concrete research**, 2000.

TAERWE, L.; GYSEL, A. V. J. Stress-strain response of high strength concrete and application of the existing models. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, 22 (8), 695-704, 1996.

ZHANG, M. H.; SHARIF, M. S. H.; LU, G. Impact resistance of high-strength fiber-reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research Journal**, 59 (3), 199-210, 2007.