

Análise da influência das fibras de aço e poliméricas nas propriedades do estado fresco e endurecido de um Concreto Reforçado com Fibras (CRF)

Analysis of the influence of steel and polymer fibers on the fresh and hardened state properties of Fiber Reinforced Concrete (FRC)

Roberto Christ(1); Fernanda Pacheco(2); Hinoel Zamis Ehrenbring(3); Jader Willian Silva dos Santos(4); Giovanna Costella Menegussi(5); Bernardo Fonseca Tutikian(6)

1 Universidad de La Costa, Barranquilla, Colômbia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1367-8972> | E-mail: rchrist@unisinis.br

2 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, itt Performance – São Leopoldo/Brazil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3455-491X> | E-mail: FERNANDAPACHE@unisinis.br

3 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, itt Performance – São Leopoldo/Brazil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0339-9825> | E-mail: hzamis@unisinis.br

4 Engenheiro Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4603-8808> | E-mail: jadersantos@unisinis.br

5 Civil Engineer, Master's student at Civil engineering postgraduation course, UNISINOS. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6313-8993> | E-mail: giovanna_menegussi@hotmail.com

6 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, itt Performance – São Leopoldo/Brazil. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1319-0547> | E-mail: bftutikian@unisinis.br

Revista de Arquitetura IMED, Passo Fundo, vol. 13, n. 1, p. 116-134, janeiro-junho, 2024 - ISSN 2318-1109

DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2024.v13i1.5008>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui!/click here!](#)

Resumo

Este estudo tem como objetivo analisar, comparativamente, as propriedades no estado fresco e endurecido de concretos reforçados com fibras (CRFs). As fibras analisadas foram de aço e polipropileno. Os reforços possuem fator de forma de 33 e teor fixo de adição de 2,00%. As idades de análise no estado endurecido foram aos 7 e 28 dias, sendo obtida a resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração e fator de tenacidade. Observou-se que as fibras, quando inseridas no teor de 2,00% em relação ao volume, impactaram na consistência do compósito por meio do abatimento. A inclusão de fibras de aço diminuiu em 20% o abatimento do CRF, e as fibras de polipropileno 30%. A resistência à compressão foi diminuída em até 9,5% com a adição das fibras. Os menores resultados foram observados com as fibras de polipropileno. O módulo de elasticidade também foi afetado pelas fibras, tendo também o CRFPP os menores valores. Na resistência à tração, as fibras de aço obtiveram os maiores valores, superando em 40% os valores do CCV. No fator de tenacidade percebeu-se maiores ganhos dos CRFs em relação ao CCV. O CRFP obteve um fator de tenacidade 636,7% superior ao CC. Já o CRFA garantiu uma margem superior ainda maior, 158,4% em relação ao CRFP e 1008,3% se comparado ao CCV. Assim, percebe-se que a adição das fibras de aço pode auxiliar nas propriedades mecânicas do compósito, desde que haja cuidados na verificação da sua reologia, evitando o surgimento de falhas e vazios internos.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras; propriedades mecânicas; tenacidade

Abstract

This study aims to comparatively analyze the properties of fiber reinforced concrete (FRC) in the fresh and hardened state. The fibers analyzed were steel and polypropylene. The reinforcements have a shape factor of 33 and a fixed addition content of 2.00%. The ages of analysis in the hardened state were 7 and 28 days, and the compressive strength, modulus of elasticity, tensile strength and toughness factor were obtained. It was observed that the fibers, when inserted at a content of 2.00% in relation to the volume, impacted the consistency of the composite through slump. The inclusion of steel fibers reduced the FRC slump by 20%, and polypropylene fibers by 30%. The compressive strength was reduced by up to 9.5% with the addition of fibers. The lowest results were observed with polypropylene fibers. The modulus of elasticity was also affected by the fibers, with the FRC also having the lowest values. In tensile strength, steel fibers obtained the highest values, surpassing the CCV values by 40%. In the tenacity factor, greater gains were observed for CRFs in relation to CCV. CRFP obtained a tenacity factor 636.7% higher than CC. CRFA guaranteed an even higher margin, 158.4% in relation to CRFP and 1008.3% compared to CCV. Thus, it is clear that the addition of steel fibers can help in the mechanical properties of the composite, as long as care is taken in checking its rheology, avoiding the appearance of internal flaws and voids.

Key-words: fiber reinforced concrete, mechanical properties; tenacity

1 Introdução

Com a adição de fibras em matrizes cimentícias, o compósito resultante pode apresentar propriedades mecânicas melhoradas tais como, o aumento da energia de ruptura, resistências à propagação de fissuras, à fadiga, dentre outras. (MEHTA; MONTEIRO, 2014; MADADU ., 2018). O concreto reforçado com fibras (CRF) é constituído por diferentes fases, dentre elas está a matriz cimentícia. Esta é uma fase de grande influência nas características físico-químicas do compósito final (HA ., 2018). A matriz atua como meio de homogeneização, absorção e transferência dos esforços atuantes aos elementos de reforço (fibras). (BEBER, 2013). A fibra e a sua zona de interface com a matriz também são classificadas como fases no CRF (EHRENBRING ., 2019).

Em relação ao reforço, uma propriedade relevante é o seu módulo de elasticidade, visto que essa propriedade influencia nas características e comportamento do CRF. Destaca-se que fibras com o módulo de elasticidade superior ao da matriz podem restringir consideravelmente a deformação, enquanto as de menor módulo de elasticidade apresentam o efeito oposto. Fibras de alto módulo podem ser consideradas como estruturais, já as de baixo módulo seriam não estruturais (SONG ., 2019).

Tasca (2010) aponta que modificar o seu desempenho pós fissuração seja a maior vantagem em se transformar uma matriz frágil em pseudo-dúctil. Em razão das transferências de tensões que ocorrem na matriz, o compósito, ao invés de romper, apresentará a formação de fissuras e uma deformação aumentada (LI, 2019). Porém, é necessário que as fibras estejam dispostas homoganeamente, com orientações perpendiculares à fissura, e volumes oportunos por toda a matriz (FIGUEIREDO, 2011).

Quanto maior for a aderência entre a superfície da fibra e a matriz, mais eficiente será a transferência de tensões e, conseqüentemente, maior será a contribuição do reforço ao compósito (BAUER ., 2020). A aderência entre as superfícies tem um aumento quando as fibras apresentam formatos com deformações ou rugosidades e as extremidades são alongadas ou possuem características onduladas ou em formato de gancho (NEVILLE; BROOKS, 2013; CHU; KWAN, 2019). Neville e Brooks (2013) apontam que a quantidade de fibras comumente utilizada para reforço estrutural de concreto é de 1 a 5% em relação ao volume total da mistura. Tanto o fator de forma quanto o teor de fibras adicionadas ao concreto influenciam diretamente à trabalhabilidade do compósito (SILVA ., 2019). Mehta e Monteiro (2014) e Yoo . (2015) classificam como baixo teor de fibras misturas com menos de 1%, um teor moderado de 1 a 2% e alto teor quando superior a 2%. Os menores teores de adição são praticados em concreto para diminuição do índice de fissuração por retração, por exemplo (EHRENBRING; TUTIKIAN; QUININO, 2018).

Quinino (2015) aponta que cada tipo de fibra age de maneira distinta nas propriedades do compósito, devendo ser escolhida de acordo com o comportamento

esperado. As fibras metálicas utilizadas no concreto, por apresentarem diâmetro e módulo de elasticidade elevado, atuam principalmente após a abertura de fissuras, assim, agindo como ponte de transmissão dos esforços e restringindo a fissuração. As poliméricas, por serem mais finas e com menor módulo de elasticidade, são empregadas para restringir a retração por fissuração no concreto em suas primeiras idades (AGHAEE; KHAYAT, 2021).

Em razão do seu alto módulo de elasticidade, as fibras de aço melhoram características do concreto com teores menores de adição, tais como: tenacidade, controle de fissuras, resistência à flexão, resistência ao impacto e à fadiga (ACI COMMITTEE, 1996; SHIN, 2021). No que se refere às tensões máximas, as fibras de aço resistem às tensões que vão de 400 a 1200 MPa, com deformações específicas últimas variam de 3 a 4%. (KOOIMAN, 2002; BENTUR; MINDESS, 2007; LI, 2019).

De acordo com Garcia Taengua (2016), a introdução de fibras de aço ao concreto está cada vez mais frequente, visto que estas dificultam a propagação das fissuras que surgem no compósito cimentício, impedindo as microfissuras que surgiriam com o tempo de cura. Recentemente, no Brasil, houve a publicação de norma técnica, a ABNT NBR 16935:2021, a qual estabelece os requisitos de desempenho mecânico para estruturas de concreto reforçado com fibras (CRF) para atuação isolada ou em conjunto com as armaduras. Também, para elementos estruturais e placas que apresentem capacidade de redistribuição de esforços, considerando a interface com meio elástico, dimensionados e verificados no estado-limite último (ELU) e no estado-limite de serviço (ELS).

Quando há o surgimento de uma fissura em um concreto sem fibras de aço, as tensões que seriam contínuas passam a ser desviadas para outra região de menor resistência. Isto é, na ponta da fissura e, havendo uma grande concentração de tensões que excedam a resistência do concreto, corre-se o risco da ruptura (TOJAL, 2011; DING, 2021). As fibras incorporadas no concreto agem como uma ponte de transferência de tensões. Deste modo, tem-se uma grande redução da propagação de fissuras, onde, com a incorporação de fibras, o material passa a dispor de uma considerável força portante pós-fissuração. (RAMOS, 2002; LI, 2019).

Figueiredo (2011) destaca que estas classificações, além de possibilitarem o estabelecimento de requisitos mínimos que podem ser correlacionados com o comportamento final do CRF, também procuram abranger uma maior gama de fibras de aço disponíveis no mercado nacional. Em relação às fibras poliméricas, sua principal função é reduzir a fissuração que ocorre no estado plástico e nas primeiras horas de endurecimento. Também, recomenda-se que não sejam utilizadas em substituição de reforços estruturais e/ou os reforços de combate à retração hidráulica, pois apresentam contribuições limitadas no concreto em estado endurecido. (ACI COMMITTEE, 1996; SHIN, 2021).

Atualmente, é possível observar o uso constante das fibras poliméricas em diversos setores da construção civil. Muito deste uso se deve ao fato de o polipropileno ser quimicamente inerte, não absorvendo água e não oxidando (XU ., 2021).

As fibras poliméricas podem ter geometrias distintas, sendo dividida entre microfibras e macrofibras. O uso de microfibras de polipropileno (diâmetro equivalente micrométrico e esbeltez próxima da unidade) já é comum no Brasil, tendo como função o controle da exsudação e a redução das fissuras geradas pela retração (EHRENBRING ., 2018). Por vez, as macrofibras de polipropileno, com fator de forma variando entre 20 e 100, são adotados como fibras estruturais. Nos EUA e na Europa o uso das macrofibras de polipropileno para fins estruturais é mais difundido que no Brasil, em que a comercialização deste tipo de fibra ainda é reduzida. (DE; DE; LEITE, 2018).

Segundo Figueiredo (2000), a adição de fibras no concreto pode afetar a consistência do compósito, no seu estado fresco, devido à limitação na mobilidade dos agregados, aumento da área superficial específica, que demanda uma grande molhagem, aumentando o atrito interno e diminuindo ainda mais a movimentação interna das partículas. As fibras podem limitar o movimento relativo dos agregados, contribuindo para a redução da trabalhabilidade, cuja uma possível solução é o aumento do teor de argamassa ou redução do diâmetro máximo dos agregados. (FIGUEIREDO; CECATTO, 2015). Alguns autores como Wang . (2021) comentam que o acréscimo de fibras em concreto pode prejudicar sua mistura, transporte e espalhamento, aumentando a quantidade de vazios, influenciando nas propriedades do estado endurecido. No geral, a trabalhabilidade do concreto no estado fresco é influenciada por diversas propriedades da fibra, como tamanho, proporção, fator de forma, rigidez e orientação. (WANG ., 2021). De todo modo, Góis (2010) ressalta que aditivos plastificantes e superplastificantes podem melhorar, consideravelmente, a reologia do compósito e garantir uma melhor distribuição das fibras na matriz.

Zeyad (2020) investigou o efeito da incorporação de diferentes tipos de fibras na segregação e no exsudação do concreto no estado fresco, e percebeu redução na exsudação para todos os tipos de fibras utilizados, sendo que a fibra de polipropileno apresentou redução de 75% em relação ao concreto sem fibras. Alusivo à segregação, o autor verificou que varia de acordo com o tipo de fibra, uma vez que apenas os concretos reforçados com fibras de polipropileno e rocha basáltica apresentaram segregação inferior à referência.

Com relação à dosagem dos CRF, Gil (2018) aponta que, no Brasil, a prática de utilização do CRF ainda é basicamente empírica, pois o uso de teores fixos de fibras e a ausência de procedimentos de controle da qualidade do compósito é recorrente. Conforme Salvador, Fernandes e Figueiredo (2015), os consumos de fibras de aço são comumente fixados como valores múltiplos de 5 kg/m^3 e não há preocupação em relação a uma dosagem compatível à matriz e verificação de desempenho. Mehta e

Monteiro (2014) destacam a importância econômica desse consumo no concreto, o que pode acabar definindo os teores de uso.

Christ (2014) afirma que, ao avaliar as propriedades de um concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), criado através de uma mistura híbrida de fibras de aço e polipropileno, obteve-se resultados satisfatórios em relação a propriedades do concreto, como o aumento da resistência à tração na flexão, com uma adição de 3% de fibras em relação ao volume, sendo os melhores resultados obtidos para uma mistura composta por fibras de aço (80%) e de polipropileno (20%).

Gil (2018) propôs um método de dosagem em que, a partir de um modelo teórico de inclusão de fibras em uma mistura concreto autoadensável (CAA), tem-se um diagrama da variação do teor de fibras para a obtenção das propriedades mecânicas requeridas, sem prejuízos às propriedades no estado fresco. Através dos ensaios no estado endurecido, pode-se verificar que a incorporação de fibras com base no método proposto contribuiu com o aumento das propriedades mecânicas das misturas, exceto no resultado do módulo de elasticidade. O estudo de dosagem de um concreto deve ocorrer visando a proporcionamento ideal e mais econômico possível, considerando os materiais disponíveis na região onde será usado e tendo como objetivo maior o atendimento de vários requisitos (TUTIKIAN; HELENE, 2011; CHRIST, 2019).

Diante desse cenário, esta pesquisa visa investigar a influência de adições de fibras de aço e poliméricas nas propriedades do CRF, tanto no estado fresco como endurecido, avaliando a trabalhabilidade, módulo de elasticidade, fator de tenacidade, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.

2 Materiais e métodos

2.1 Materiais

A proporção dos materiais utilizados para o desenvolvimento da mistura da pesquisa está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Traço utilizado na pesquisa

Mistura	kg/m ³						
	Cimento	Areia	Brita	Água	Adit.	Aço	PP
CCV	420	966	924	189	2,1	-	-
CRFA	420	966	924	189	2,1	157	-
CRFPP	420	966	924	189	2,1	-	18,2

Legenda: CCV – concreto convencional; CRFA- concreto reforçado com fibra de aço; CRFP – concreto reforçado com fibra de polipropileno

O cimento utilizado nesta pesquisa foi um cimento Portland com 10% de carbonato de cálcio (CP-V ARI RS), contendo 19,53% de SiO₂, 3,91% de Al₂O₃, 63,19% de CaO, 3,20% de SO₃, 5,70 de MgO, com densidade específica de 3,10 g/cm³ e área superficial Blaine de 4.770 cm²/g. A areia utilizada foi proveniente de rio, com massa específica de 2,75 g/cm³, módulo de finura de 1,87 e diâmetro máximo de 2,36 mm. O agregado graúdo utilizado foi uma brita de origem basáltica, com massa específica de 2,85 g/cm³, módulo de finura de 5,95 e diâmetro máximo de 12,5 mm. Para esta pesquisa foi utilizado um aditivo superplastificante a base de policarboxilatos, sendo este adicionada em teor único para as três misturas. As fibras utilizadas nesta pesquisa são apresentadas na Figura 1. Ambas são classificadas como macrofibras. Estas foram escolhidas devido a sua representatividade e aplicação no mercado nacional.



Fibra de aço



Fibra de polipropileno

Figura 1. Fibras de aço e de polipropileno utilizadas na pesquisa

As propriedades das fibras são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades físicas e mecânicas das fibras

Propriedades	Fibras	
	Aço	Polipropileno
Diâmetro (mm)	0,75	0,8
Comprimento (mm)	25	27
Fator de forma	33	33
Resistência à tração (MPa)	1.100	3.400
Módulo de elasticidade (GPa)	210	8,6
Densidade (kg/m ³)	7.850	910

2.2 Ensaio de caracterização

No estado fresco, a consistência dos compósitos foi avaliada seguindo as prescrições da ASTM C143-12. Em todas as misturas, o ensaio foi realizado 3 minutos após os constituintes serem inseridos. No estado endurecido, as propriedades mecânicas foram avaliadas nas idades de 7 e 28 dias, sendo que resistência à compressão determinada pela ASTM C39-21 e o módulo de elasticidade pela ASTM C469-02. A resistência à tração na flexão e o fator de tenacidade foram realizadas segundo a ASTM C1609-12. Os corpos de prova foram moldados e acomodados em sala climatizada com temperatura constante de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade de 95 a 100%, até a realização dos ensaios.

3 Resultados e discussões

3.1 Estado fresco

Os resultados das diferentes misturas no ensaio de abatimento são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados do ensaio de abatimento

Traço	Abatimento (mm)	
CCV	200	-
CRFA	160	↓ 20%
CRFPP	140	↓ 30%

Com base nos resultados, pode-se perceber que os CRFs apresentaram menor abatimento em relação ao CCV, indicando um impacto negativo. A diminuição do abatimento dos compósitos já era esperada, conforme apresentado por Christ (2019). Quanto menor o abatimento, maiores as dificuldades de adensar a mistura nas fôrmas. Assim, maior a probabilidade de formarem-se vazios no CRF, prejudicando suas propriedades no estado endurecido. Concretos com menos plásticos, como o caso destes apresentados na pesquisa, necessitam de maior energia de vibração.

É importante destacar que, mesmo com um elevado percentual de fibras (2%), os diferentes concretos reforçados apresentaram abatimento adequado para aplicação em estruturas de concreto armado convencionais, atendendo a classe S160, conforme ABNT NBR 8953:2015. Pesquisas relacionadas à adição de fibras ao concreto, como a de Quinino (2015) e Ehrenbring et al. (2019), também verificaram que a inserção destes reforços fibrosos reduziu a consistência da mistura.

As consistências identificadas para cada mistura, em relação à matriz referência, também foram identificadas por Figueiredo e Cecatto (2015), indicando uma

comprovação importante de comportamentos dos CRFs. O CRFA apresentou um abatimento de 160 mm, ou seja, 20% menor que o CCV. Já o CRFPP foi de 30%. As fibras poliméricas apresentaram maior perda de abatimento, pelo fato da seção transversal da fibra possuir maior dimensão e por haver mais fibras na seção na matriz. A perda de abatimento da mistura é pelo fato de a fibra interferir com maior intensidade na reologia, dificultando a mobilidade dos agregados (CORRADI ., 2016; YANG ., 2016). Fibras poliméricas, por terem menor densidade, acabam tendo uma maior quantidade de unidades de fibras dentro do compósito, conforme Ehrenbring e Tutikian (2023). Mesmo as fibras tendo fator de forma equivalente, o número de reforços de polipropileno foi 8 vezes maior que as de aço. Mesmo assim, não diminuíram em 8 vezes o abatimento. Assim, entende-se que as fibras utilizadas impactaram o menos possível, para um teor de adição tão elevado.

3.2 Resistência à compressão

Na Figura 2 são apresentados os resultados de resistência à compressão média e desvio padrão dos compósitos analisados neste trabalho.

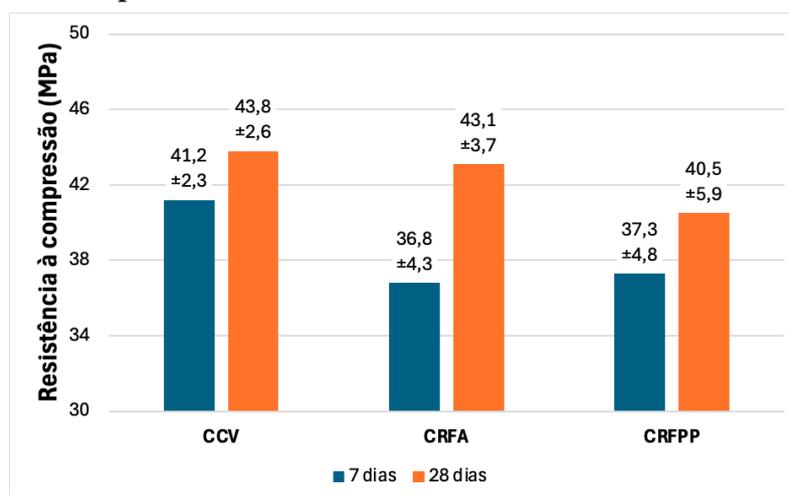


Figura 2. Valores de resistência à compressão média e desvio padrão de cada compósito

Com base nos valores apresentados na Figura 2, foi possível constatar que a resistência à compressão dos compósitos permaneceu próxima, tanto aos 7 quanto aos 28 dias. No entanto, os valores mais baixos da pesquisa foram obtidos pelo CRFPP. Este comportamento já era esperado, uma vez que as fibras de polipropileno não proporcionam melhorias na resistência à compressão do compósito, por não terem propriedades mecânicas compatíveis à matriz cimentícias. Estes resultados também foram observados por Ehrenbring et al. (2018). A resistência média para o CCV reduziu 9,5% e 7,5% aos 7 e 28 dias, respectivamente. A diminuição da resistência, além das características das fibras, pode ter sido provocada pelo surgimento de falhas no interior do compósito, como vazios e ar incorporado. Estas falhas diminuem a resistência do

CRF, além de indicarem uma maior variabilidade nos resultados. Esta variabilidade também foi identificada no CRFPP, uma vez que os desvios padrão foram os maiores da pesquisa, cerca de 2 vezes maiores que o desvio do CCV.

Já no caso do CRFA, pode-se considerar os mesmos fatores observados para os compósitos contendo fibras de polipropileno. No entanto, a resistência média aos 28 dias foi superior, aproximando-se àquela do CCV. As fibras de aço são reforços com propriedades mecânicas superiores às fibras poliméricas, principalmente, seu módulo de elasticidade. Quando inseridas na matriz, podem manter ou aumentar a resistência à compressão do concreto (EHRENBRIN, et al., 2019). Porém, podem provocar dificuldades na mistura e dispersão dos materiais dentro do CRF, favorecendo a formação de vazios e falhas. Assim, os ganhos que a fibra de aço poderia proporcionar ao compósito são limitadas aos vazios internos inerentes ao compósito. Cabe ao tecnologista dosar corretamente a quantidade e tipo de fibras para cada matriz de concreto, a fim de obter os maiores valores de resistência. Os desvios padrão deste compósito foram menores que àqueles observados no CRFPP, indicando que para teores de 2%, as fibras de aço podem provocar um menor número de falhas internas. Em relação ao CCV, o CRFA apresentou resistência média 1,6% menor. No entanto, foi possível identificar resultados potenciais de até 46,8 MPa para o CRFA, superior ao potencial do CCV (46,4 MPa). Com isso, entende-se que, quando isento de falhas e danos, o CRFA pode proporcionar resistência à compressão superior ao compósito sem reforço.

Estes resultados podem ser relacionados aos de abatimento, tendo o CRFA um abatimento maior que o CRFPP, o que favorece a moldagem e, conseqüentemente, a resistência à compressão. No estado fresco, as fibras causaram uma alteração na reologia da mistura, gerando uma menor trabalhabilidade, conseqüentemente uma menor fluidez, ocasionando um maior teor de vazios em seu interior, reduzindo a sua resistência à compressão. Estes fatores são evidenciados nos estudos de Liu . (2019), Matar e Assaad (2019) e Quinino (2015).

Comparando os valores de resistência à compressão entre os dois tipos de fibras utilizados, percebe-se que não há um consenso entre os resultados. Aos 7 dias, o CRFP alcançou resistência em torno de 1,3% superior ao CRFA, enquanto aos 28 dias a situação se inverte, isto é, o CRFA atingiu resistência cerca de 6,4% superior ao CRFP. Conforme esperado, e de acordo com resultados similares a outras pesquisas (FIGUEIREDO, 2000; MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 1997), a presença de fibras na matriz de um CRF não provoca melhoras nos valores de resistência à compressão.

3.3 Módulo de Elasticidade

Na Figura 3 estão apresentados os valores médios obtidos no ensaio de módulo de elasticidade nas idades de 7 e 28 dias.

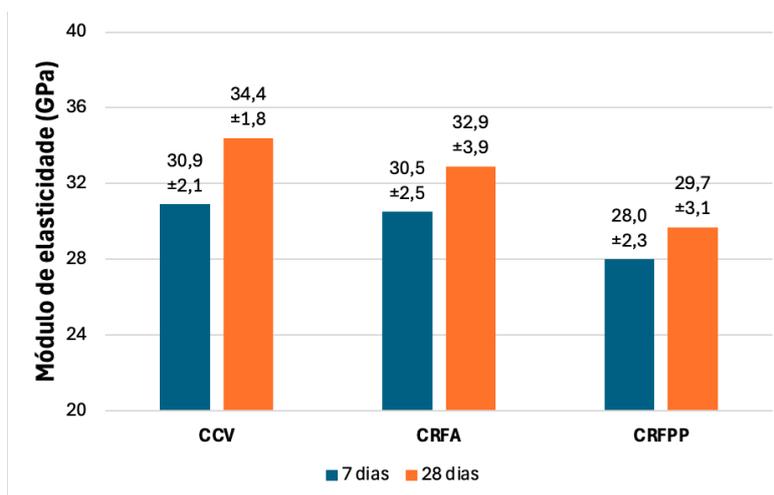


Figura 3. Valores de módulo de elasticidade tangente inicial e desvio padrão de cada compósito

O comportamento dos resultados de módulo de elasticidade foram semelhantes aos valores observados nos ensaios de resistência à compressão, tendo resultados inferiores ao CCV. As fibras de polipropileno provocaram a maior diminuição no módulo de elasticidade, indicando reduções de 13,7% em relação ao CCV aos 28 dias. Além da formação de vazios no compósito, que impactam negativamente o módulo de elasticidade do material, as fibras de polipropileno são mais deformáveis que as fibras de aço, diminuindo ainda mais o módulo do material. Entende-se que as fibras de polipropileno, para o ensaio de módulo de elasticidade, proporcionam consequências semelhantes às falhas de mistura e moldagem do CRF. Os valores de desvio padrão do CRFPP mantiveram-se semelhante ao CRFA, como já era esperado.

Para o CRFA, os valores médios de módulo de elasticidade foram 4,4% inferiores aos CCV, aos 28 dias, também sendo justificado pelos vazios da matriz. No entanto, foram registrados resultados de até 36,8 GPa, superando o resultado potencial do CCV. Entende-se que, as fibras de aço podem aumentar o módulo de elasticidade do compósito devido as suas propriedades físicas e mecânicas. Este comportamento também foi perceptível nos resultados de resistência à compressão.

Hannawi (2016), ao compararem amostras com fibras metálicas e poliméricas, observaram que o valor obtido de módulo de elasticidade foi 15% superior nas amostras metálicas, sendo este valor compatível com os resultados desta pesquisa. Assim, pode-se indicar que os resultados desta pesquisa confirmam o comportamento observado em outros estudos.

3.4 Resistência à tração e tenacidade na flexão

Na Figura 4 estão apresentados os valores médios obtidos no ensaio de tração na flexão nas idades de 7 e 28 dias.

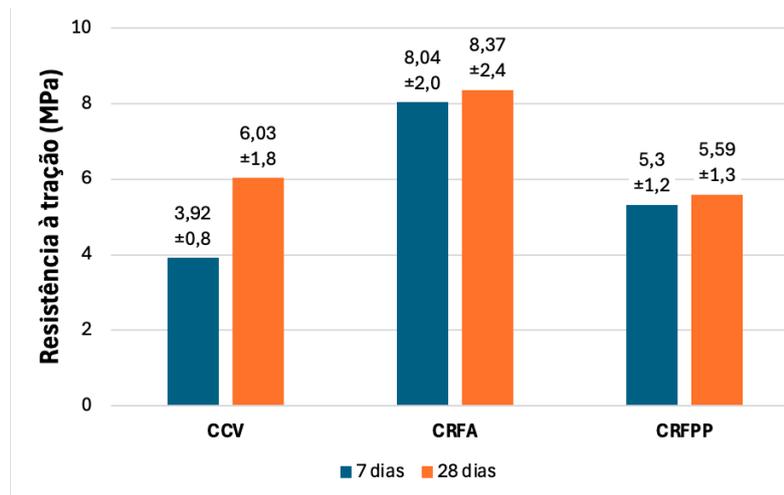


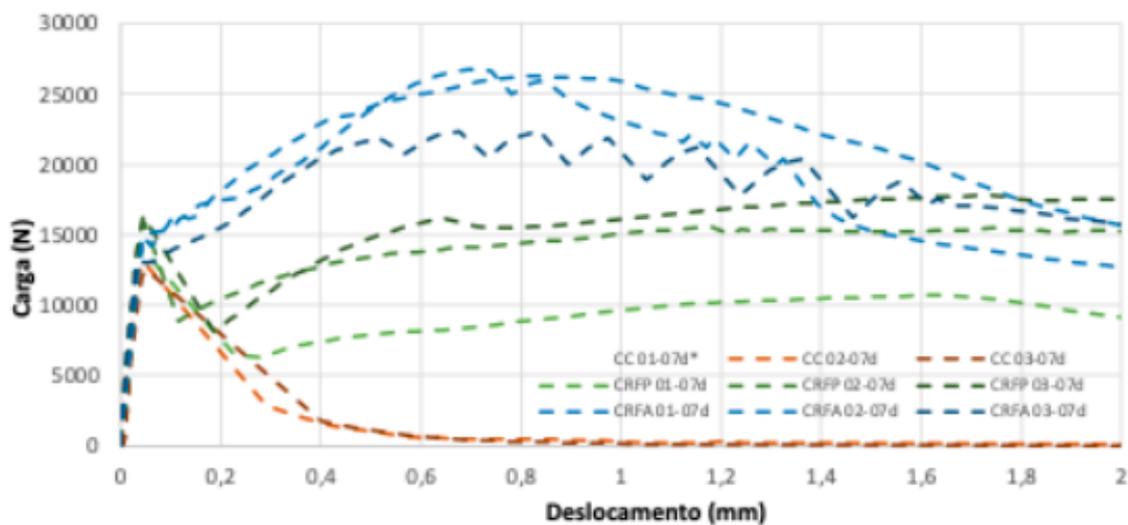
Figura 4. Valores de resistência à tração na flexão e desvio padrão de cada compósito

Como já esperado, as fibras de polipropileno apresentaram maior resistência à tração que a matriz apenas aos 7 dias, uma vez que a diferença de rigidez entre as fases não era tão desproporcional. A medida que a matriz foi ganhando rigidez (elevação do módulo), as fibras poliméricas não proporcionaram mais benefícios. Pode-se perceber que a resistência à tração na flexão do CCV, aos 28 dias, foi maior que o CRFPP, indicando que, neste caso, as fibras de polipropileno prejudicaram a propriedade mecânica. Novamente, como justificativa para esses valores, entende-se que as falhas ocorridas pelas fibras na matriz provocaram redução da resistência à tração. Ao contrário da resistência à compressão, na tração, os vazios e falhas são mais determinantes nos resultados, conforme Ehrenbring et al. (2019).

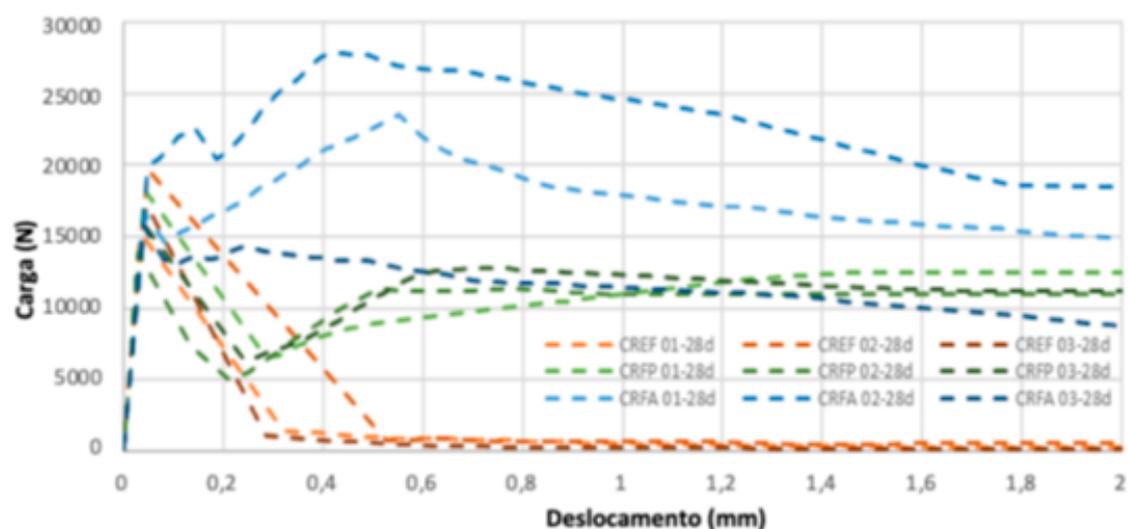
Também seguindo um comportamento esperado, o CRFA atingiu os maiores valores de resistência à tração, uma vez que as fibras atuam realmente como reforços estruturais, melhorando esta propriedade. Com o elevado teor, esse ganho de resistência está proporcional ao observado em demais pesquisas, como de Quinino (2015). Diferentemente do concreto convencional, que se rompe rapidamente com a carga aplicada sobre ele, o CRFA suporta cargas expressivas em um período de tempo maior, com deformação superior às do concreto sem fibra.

Bentur e Mindess (1990) e Figueiredo (2011) concluíram que a resistência à tração na flexão está diretamente ligada a fatores como: volume de fibras, o tipo de material do qual as fibras são compostas, os formatos e como elas estão distribuídas na matriz. As fibras de aço podem proporcionar ao CRFA aumentos de resistência à tração na flexão que podem chegar a 100%, por sua vez, as fibras poliméricas não agregam ganhos relevantes ao CRFP em relação ao CCV.

Na Figura 5 são apresentadas as curvas dos compósitos analisados neste estudo.



(a) 7 dias



(b) 28 dias

Figura 5. Curvas para (a) 7 dias e (b) 28 dias dos compósitos analisados

O comportamento dos compósitos aos 7 e 28 dias é semelhante, sem alterações consideráveis. Inicialmente, percebe-se que há uma reta de mesma intensidade e inclinação para todos os compósitos. Esta reta inicial refere-se ao comportamento da matriz cimentícia. Tanto o CCV e CRFs são iguais, pois trata-se da matriz cimentícia com as mesmas propriedades. A variação entre os concretos está logo após a inflexão da reta, conformando em curvas ascendente e descendentes. Neste ponto de inflexão formou-se a primeira fissura no compósito. No caso do CCV, como não havia reforços, apresentou queda repentina. Já para os CRFs, por terem fibras que atuam como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, ainda apresentavam carga à medida em que o deslocamento vertical aumentava.

As fibras metálicas, por terem melhores propriedades mecânicas que as fibras de polipropileno, apresentaram resultados superiores de carga e deslocamento. Todos os

corpos de prova tiveram curvas ascendentes, indicando a eficiência do reforço metálico. Já para as fibras poliméricas, sabendo da sua limitação física, não contribuíram como as de aço, mas mostraram melhoria na tenacidade. Percebe-se que, quando os compósitos apresentam acréscimo de deslocamento com manutenção/ganho das cargas, pode-se considerar esse comportamento como dúctil ou pseudo-dúctil. Como o módulo de elasticidade da fibra e sua aderência na matriz influenciam a resposta pós-fissuração, o comportamento mecânico de concretos reforçados com macrofibras poliméricas ou com fibras de aço tende ser bastante distinto. (FIGUEIREDO, 2011; GIL, 2018; EHRENBRING ., 2019).

Com base nas curvas de cada compósito, foi possível determinar o fator de tenacidade, como é apresentado na Figura 6.

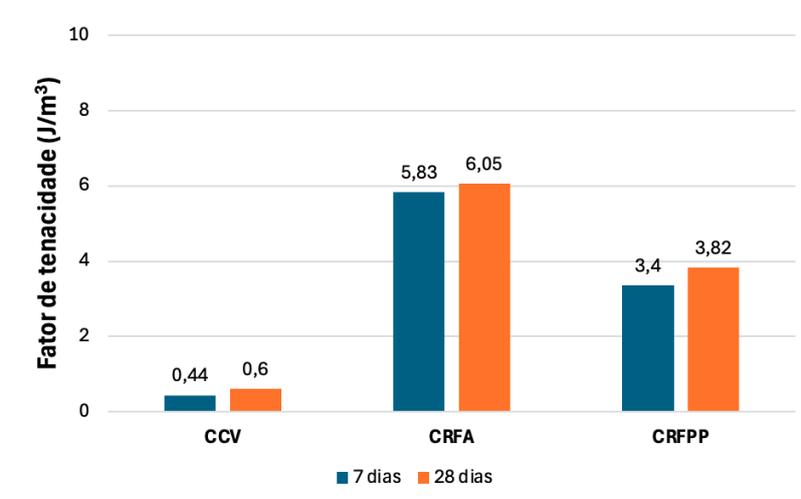


Figura 6. Fator de tenacidade médio os compósitos analisados

Os resultados obtidos mostram que o emprego de fibras, sejam elas poliméricas ou de aço, elevam consideravelmente o fator de tenacidade em relação ao CCV. Através dos resultados, pode-se observar um aumento superior a 6 vezes do fator de tenacidade do CRFP em relação ao CCV. Para o CRFA, o aumento foi ainda maior, cerca de 1,6 vezes em relação ao CRFP e superior a 10 vezes em relação ao CCV.

Comparando os tipos de fibras entre si, percebe-se que, aos 7 dias, o CRFA apresenta um aumento no fator de tenacidade aproximadamente 1,7 vezes superior ao CRFP. Aos 28 dias, o comportamento é semelhante, com um aumento de 1,6 vezes do CRFA em relação ao CRFP.

Simões (2017), ao analisarem diferentes naturezas de fibras (polipropileno, de vidro e aço), perceberam comportamentos bastante diferentes, mesmo considerando o mesmo teor de fibras. Também no estudo desses autores, os valores obtidos foram muitos superiores com a fibra metálica em relação à polimérica. Hannawi . (2016) avaliaram diferentes naturezas de fibras e perceberam em matrizes de ultra alto

desempenho um comportamento superior das fibras metálicas no comportamento mecânico, concordando com os resultados obtidos.

Ehrenbring. (2019) investigaram a adição de fibras poliméricas ao concreto e concluíram que as fibras aumentaram em até 20 vezes a resistência residual do material, sendo que as fibras de poliéster reciclado foram as que apresentaram melhor desempenho. Badogiannis . (2019) examinaram o efeito de diferentes formatos de fibras de aço ao concreto – extremidade de gancho oposto e extremidade de gancho duplo – e observaram que misturas com fibras de gancho opostos apresentaram comportamento pós fissura descendente, ao passo que as misturas de fibras com ganchos duplos conferiram comportamento ascendente pós fissura. Ainda, os autores compararam os resultados com fibras de polipropileno e verificaram que estas também possuem comportamento descendente, semelhante às fibras de aço com ganchos opostos. No entanto, todas as misturas obtiveram desempenho superior ao concreto convencional.

Em seu estudo acerca do efeito da adição diferentes tipos de fibras – juta, nylon e polipropileno – na energia total absorvida na flexão em concretos, Zia e Ali (2017) observaram que misturas com fibras de polipropileno obtiveram o melhor desempenho, seguida das fibras de nylon e de juta, com aumentos de 100%, 68% e 53% em comparação ao concreto simples, respectivamente. Esses estudos destacam que a incorporação de fibras na matriz do concreto em muito contribui no comportamento pós fissuração do concreto.

4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que:

- a. A resistência à compressão, aos 28 dias, nos CRFs foi inferior aos valores do CCV, também apresentando maior desvio padrão. O CRFP apresentou perda de resistência de cerca de 7,6% em relação ao CCV, enquanto a resistência do CRFA reduziu em torno de 1,6% em relação ao CCV. Ainda, o CRFA conferiu maior resistência ao concreto aos 28 dias quando comparado ao CRFP, com aumento de 6,4%.
- b. As fibras de polipropileno indicaram a maior redução do módulo de elasticidade (13,7%), em relação ao CCV. Já a redução apresentada pelo CRFA foi de 4,4%. A variabilidade dos valores foi semelhante aos resultados de resistência à compressão, uma vez que falhas internas nos compósitos foram provocadas pela inclusão dos altos teores de fibras. Na idade final, o concreto com fibras de aço obteve módulo de elasticidade 10,8% superior ao concreto com fibras poliméricas.
- c. Os resultados de resistência à tração na flexão, aos 28 dias, demonstraram uma perda, mesmo que pouco relevante (7,3%) do CRFP em relação ao CCV,

por outro lado, o CRFA obteve uma resistência à tração na flexão 38,8% superior ao CC e 49,7% em relação ao CRFP.

- d. No fator de tenacidade percebeu-se maiores ganhos dos CRFs em relação ao CCV. O CRFP obteve um fator de tenacidade 636,7% superior ao CC. Já o CRFA garantiu uma margem superior ainda maior, 158,4% em relação ao CRFP e 1008,3% se comparado ao CCV. Em comparação ao CRFP, o CRFA demonstrou resultados mais satisfatórios para todos os ensaios realizados.

Referências

AGHAEE, K; KHAYAT, K;H. Effect of shrinkage-mitigating materials on performance of fiber-reinforced concrete- An overview. *Construction and Building Materials*, 305, pp. 1-15, 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI COMMITTEE. ACI 544.1R-96: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. *Detroit: ACI Committee*, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16935. Projeto de estruturas de concreto reforçadas com fibra- procedimento. Rio de Janeiro, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – C143. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – C39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – C469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – C1609. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), 2012.

BADOGIANNIS, E G; CHRISTIDIS, K I; TZANETATOS, G E. Evaluation of the mechanical behavior of pumice lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, [], v. 196, p. 443–456, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.109>.

BAUER, A. L. ; EHRENBRING, H. Z. ; SCHNEIDER, D. ; QUININO, U. ; TUTIKIAN, B. F. Evaluation of the impact of two types of steel fibers (SE), mono and 3D, on concrete properties, when added isolated or blended. *REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS*, v. 13, p. 464-482, 2020.

BEBER, A. J. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçado com Compósitos de Fibra de Carbono. *Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 2013.

CHRIST, R. Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos

- com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental. *Universidade do Rio Sinos - UNISINOS*, p. 1–114, 2014.
- CHRIST, R. Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC.). *Universidade do Vale do Rio dos Sinos*, doutorado, p 1-152, 2019.
- CHU, S.H; KWAN, A.K.H. A new bond model for reinforcing bars in steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 104, p1-12, 2019.
- CORRADI, M. . Fully reversible reinforcement of softwood beams with unbonded composite plates. *Composite Structures*, v. 149, p. 54–68, 2016.
- DE, U.; DE, P. E. D. E. E.; LEITE, D. O. Avaliação do uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais. 2018.
- DING, Y; LI, D; MA, Y; LIU, G; SONG, S; ZHANG, D; DING, G. Self-localization of the flexural cracks of fiber reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 302, p1-9, 2021.
- EHRENBRING, H. Z.; QUININO, U. ; SILVA, L. ; TUTIKIAN, B. F. Experimental method for investigating the impact of the addition of polymer fibers on drying shrinkage and cracking of concretes. *Structural Concrete*, v. 20, p. 1064-1075, 2019.
- EHRENBRING, H. Z; TUTIKIAN, B.F; QUININO, U.C.M. Análise comparativa da retração por secagem de concretos com fibras novas e recicladas de poliéster. *AMBIENTE CONSTRUÍDO (ONLINE)*, v. 18, p. 195-209, 2018.
- EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F. Concreto flexível com fibras: Princípios, dosagem e aplicações do engineered cementitious composites (ECC). 1ª Edição, São Paulo-SP, Leud, 2023.
- FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras de aço. *São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, 2000.
- FIGUEIREDO, A. D. *Concreto reforçado com fibras*. [s.l.] USP, 2011.
- FIGUEIREDO, Antonio Domingues De; CECCATO, Marcos Roberto. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. [], v. 18, n. 6, p. 1284–1290, 2015.
- GARCIA TAENGUA, E. . *Effect of residual strength parameters on FRC flexural creep: multivariate analysis*. [s.l: s.n.].
- GIL, A. M. *CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS REFORÇADOS COM FIBRAS METÁLICAS*. [s.l.] UNISINOS, 2018.
- GÓIS, F. A. P. *AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE CONCRETO FLUIDO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto*, 2010.
- HA, K; CHOI, H; SHIN, M; PARK, K. On the size effect of interfacial fracture between concrete and fiber reinforced polymer. *Cement and Concrete Composites* 93 p. 99–106, 2018.
- HANNAWI, K; BIAN, H; PRINCE-AGBODJAN, W; RAGHAVAN, B. Effect of different types

- of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concretes. *Composites Part B* 86, p214-220, 2016
- KOOIMAN, J. Governance. A Social-Political Perspective BT - Participatory Governance: Political and Societal Implications. In: GROTE, J. R.; GBIKPI, B. (Eds.). . Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2002. p. 71–96.
- LI, V. C. *Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure*. Germany, Springer Nature, 2019
- LIU, X. . Properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, v. 226, p. 388–398, 2019.
- MADADU, A; TIBERTI, G; GERMANO, F; PLIZZARI, G; MORBI, A. The effect of fiber orientation on the post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete under bending and uniaxial tensile tests. *Cement and Concrete Composites*, 93, p.274-288, 2018.
- MATAR, P.; ASSAAD, J. J. Concurrent effects of recycled aggregates and polypropylene fibers on workability and key strength properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, v. 199, p. 492–500, 2019.
- MEHTA; MONTEIRO. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. *PINI*, v. Vol. 1, 1994.
- MEHTA; MONTEIRO. Concreto microestrutura, propriedades e materiais. *Ibracon*, v. 4 ed., n. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. Concreto microestrutura, propriedades e materiais. 4 ed. São Paulo, Ibracon, 2014., 2014.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2007.
- NEVILLE; BROOKS. Tecnologia do concreto. *Brookman*, v. 2º Edição, 2013.
- QUININO, U. C. DE M. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras. 2015a.
- QUININO, U. C. DE M. *Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras*. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2015b.
- RAMOS, M. F. Análise experimental de tubos de concreto reforçado com fibras de aço. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)*. Universidade Federal de Campinas, 2002.
- SALVADOR, R.P.; FERNANDES, J.F.; FIGUEIREDO, A.D. revista *Matéria*, v.20, n.4, pp. 961 – 974, 2015.
- SHIN, H.; KIM, K; OH, T; YOO, D. Effects of fiber type and specimen thickness on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to uniaxial and biaxial stresses. *Case Studies in Construction Materials*, 15, p1-15, 2021.
- SILVA, G.C.S ; CHRIST, ROBERTO ; Fernanda Pacheco ; Souza, C.F.N ; GIL, A. M. ; TUTIKIAN, B.F . Evaluating steel fiber-reinforced self-consolidating concrete performance. *Structural*

Concrete, p. 1-10, 2019.

SIMÕES, T; COSTA, H; DIAS-DA-COSTA, D; JULIO, E. Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes. *Construction and building materials*, 137, 548-556.

SONG, R. . Microstructure and Composition of Hardened Paste of Soda Residue-Slag-Cement Binding Material System. *Frontiers in Materials*, v. 6, ago. 2019.

TASCA, M. Estudo da viabilidade de adição de fibras de aço no concreto exposto ao ambiente marítimo : Análise da melhoria das propriedades de resistência. *4o Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande – RS*, 2010.

TOJAL, T. L. Contribuição Ao Estudo Da Aderência De Barras De Aço Em Concreto Autoadensável Reforçado Com Fibras Metálicas. 2011.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. *Dosagem dos Concretos de Cimento Portland*. V.1 ed. São Paulo: Concreto:Ciência e Tecnologia, 2011.

WANG, Wenzhen Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete — A review American Society of Testing Materials. *Construction and Building Materials*, [], v. 296, p. 123734, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123734>.

XU, H; Wang, Z; Shao, Z; CAI, L; JIN, H; ZHANG, Z; QIU, Z, RUI, X; CHEN, T. Experimental study on durability of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Construction and building Materials*, 306, p1-23, 2021.

YANG, H. . Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. *Construction and Building Materials*, v. 106, p. 550–563, 2016.

YOO, D; YOON, Y; BANTHIA, N. Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content and strain-rate. *Cement and Concrete composites* 64, p84-92, 2015.

ZEYAD, Abdullah M. Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete. *Integrative Medicine Research*, [], v. 9, n. 3, p. 4147–4158, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.042>.

ZIA, Asad; ALI, Majid. Behavior of fiber reinforced concrete for controlling the rate of cracking in canal-lining. *Construction and Building Materials*, [], v. 155, p. 726–739, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.078>.