

Correlação entre propriedades mecânicas e velocidade de propagação de onda ultrassônica em concretos reforçados com fibras de aço incluindo uma análise por rede neural

Correlation between mechanical properties and ultrasonic pulse velocity in steel fiber reinforced concretes including a neural network analysis

Gabriela Mazureki Campos Bahniuk 

Eduardo Rigo 

Ricardo Pieralisi 

Marcelo Henrique Farias de Medeiros 

Roberto Dalledone Machado 

Resumo

A partir da técnica de velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU) é possível avaliar propriedades mecânicas de concretos, incluindo o concreto reforçado com fibras (CRF). Assim, o objetivo deste trabalho é verificar possíveis correlações entre as propriedades mecânicas do CRF e VPU, com base em dados experimentais de publicações selecionados após uma revisão sistemática da literatura. Também foram avaliadas relações entre a VPU e a resistência à compressão a partir de modelos propostos por pesquisadores. Aplicou-se a técnica de rede neural artificial (RNA) para analisar quais propriedades, quando associadas com a VPU, auxiliam na estimativa da resistência à compressão do CRF. Observou-se que os modelos propostos pela literatura para estimar a resistência à compressão por meio da VPU não foram eficazes. O modelo de RNA resultou em um coeficiente de determinação de 0,973, uma acurácia de 3,18 MPa e utilizou como dados de entrada a VPU, o consumo de cimento e a relação a/c, além de três neurônios na camada escondida e um dado de saída (resistência à compressão).

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras. Fibras de aço. Propriedades mecânicas. Velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rede neural.

Abstract

The ultrasonic wave propagation velocity (UPV) technique enables the evaluation of mechanical properties of concrete, including fiber reinforced concrete (FRC). Therefore, the objective of this study is to verify potential correlations between the mechanical properties of FRC and UPV, based on experimental data selected after a systematic literature review. Additionally, relationships between UPV and compressive strength were assessed using models proposed by researchers. An artificial neural network (ANN) technique was applied to analyze which properties, when associated with UPV, assist in estimating the compressive strength of FRC. It was observed that the literature-proposed models for estimating compressive strength using UPV proved to be ineffective. The ANN model resulted in a determination coefficient of 0.973, an accuracy of 3.18 MPa, utilizing UPV, cement consumption, and the water-to-cement ratio as input data, with three neurons in the hidden layer and one output data (compressive strength).

Keywords: Fiber Reinforced Concrete. Steel fibers. Mechanical properties. Ultrasonic pulse velocity. Neural network.

^{1,2}Gabriela Mazureki Campos Bahniuk

¹Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

²Universidade Estadual de Ponta Grossa
Ponta Grossa - PR - Brasil

³Eduardo Rigo

³Universidade Federal da Integração
Latino-Americana
Foz do Iguaçu - PR - Brasil

⁴Ricardo Pieralisi

⁴Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

⁵Marcelo Henrique Farias de Medeiros

⁵Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

⁶Roberto Dalledone Machado

⁶Universidade Federal do Paraná
Curitiba - PR - Brasil

Recebido em 21/09/22

Aceito em 17/08/23

Introdução

A fim de obter materiais de construção com maior resistência e durabilidade, constantes pesquisas são desenvolvidas na Engenharia, resultando na adoção de novas tecnologias. O concreto reforçado com fibra (CRF) é um exemplo de material de construção com propriedades superiores em comparação ao concreto convencional. A inclusão de fibras no concreto reduz a fissuração e melhora algumas propriedades mecânicas, por exemplo, a resistência à tração, tenacidade e ductilidade, quando as fibras são distribuídas de maneira homogênea e utilizadas em quantidade adequada (Bolat *et al.*, 2014; Song; Hwang, 2004), sendo a principal justificativa para sua utilização no concreto (Thomas; Ramaswamy, 2007). A transformação do comportamento frágil do concreto em comportamento dúctil, auxilia a retardar a propagação e a abertura de fissuras (Benaicha *et al.*, 2015). Entretanto, as fibras também podem ter efeitos negativos em algumas propriedades do concreto, como a trabalhabilidade, que é reduzida com o acréscimo da adição de fibras (Afroughsabet; Biolzi; Ozbakkaloglu, 2016).

Observações distintas quanto a influência das fibras nas propriedades de resistência à compressão e do módulo de elasticidade são observadas na literatura. Tsioulou, Lampropoulos e Paschalis (2017) concluíram que as fibras de aço melhoram a resistência à compressão do concreto e não afetam o módulo de elasticidade do material. Suksawang, Wtaife e Alsabbagh (2018) observaram uma redução do módulo de elasticidade, em média 10%, mesmo havendo um acréscimo na resistência à compressão. Por outro lado, Benaicha *et al.* (2015) verificaram que com o aumento da quantidade de fibras, o módulo de elasticidade teve um pequeno aumento enquanto Shi *et al.* (2020) afirmam que não há evidências suficientes indicando que o módulo de elasticidade e a resistência à compressão possa ser correlacionada com o volume de fibras incorporado ao concreto.

Sabe-se que as propriedades mecânicas do CRF podem ser afetadas por diversos fatores, que incluem a geometria da amostra, o tempo de cura, a relação água/cimento, os tipos de cimento, a geometria das fibras, a razão de aspecto (comprimento da fibra/diâmetro equivalente), o volume de fibra, entre outras (Xu; Shi, 2009). Desse modo, muitos pesquisadores têm estudado as propriedades mecânicas do CRF utilizando a técnica de velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU), que é um método eficaz e não destrutivo utilizado na avaliação das propriedades do concreto (Benaicha *et al.*, 2015; Trtnik; Kavčič; Turk, 2009; Nematzadeh, Tayebi, Samadvand, 2021; Nikbin *et al.*, 2022). Estudos como o de Tabatabaeian *et al.* (2017), Hassan e Jones (2012) e Qasrawi (2000) afirmam que a propagação de ondas ultrassônicas é a técnica de ensaio não destrutivo mais utilizada na caracterização mecânica de materiais cimentícios devido a confiabilidade, facilidade e economicidade.

Os resultados da VPU do CRF diferem da do concreto convencional, sem fibras, por duas razões. Primeiro, como a VPU medida é diretamente proporcional à densidade do meio em que é transmitida, a adição de fibras pode alterar a densidade do concreto e, portanto, os resultados da VPU. E segundo, porque o nível de compactação e, conseqüentemente, a porosidade do concreto pode ser influenciada pela incorporação de diferentes quantidades de fibras (Ashrafian *et al.*, 2018).

O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica para avaliar a qualidade do concreto é feito através de uma sonda (Nematzadeh; Tayebi; Samadvand, 2021). Velocidades mais altas especificam uniformidade e qualidade do concreto, enquanto velocidades mais baixas podem indicar concreto com fissuras ou vazios (ASTM, 2016). Os resultados obtidos por Benaicha *et al.* (2015) mostraram que a velocidade do pulso ultrassônico pode ser muito útil para estudar a homogeneidade e a qualidade do concreto reforçado com fibra de aço. Entretanto, ressaltam que uma estimativa da resistência do concreto deve ser feita em conjunto com uma correlação obtida em testes de laboratório em um concreto com as mesmas condições. Ainda, é difícil avaliar com precisão a relação entre resistência à compressão do concreto e a velocidade do pulso ultrassônico, uma vez que os valores da velocidade são afetados por diversos fatores, que por vezes não influenciam a resistência à compressão do concreto (Trtnik; Kavčič; Turk, 2009). Essa relação é afetada pelo tamanho e teor do agregado; tipo e teor de cimento; relação água/cimento; e tipo e conteúdo da fibra (Hedjazi; Castillo, 2020).

Testes foram realizados para determinar o efeito das fibras na velocidade de pulso ultrassônico e na resistência à compressão do CRF e observou-se que a velocidade de pulso ultrassônico diminuiu com a adição de fibras de aço (Hedjazi; Castillo, 2020; Yazici; Inan; Tabak, 2007). O motivo da redução é o desenvolvimento de vazios e a não homogeneidade, que retarda a velocidade do pulso ultrassônico. Hedjazi e Castillo (2020) observaram ainda que as equações encontradas na literatura que relacionam a VPU do CRF com a sua resistência à compressão apresentaram altos coeficientes de variação (variando de 23,2% a 78,6% para o CRF com fibras de aço).

No estudo, incluiu-se ainda a análise por redes neurais artificiais (RNA), como uma ferramenta computacional, para simular as interações entre as variáveis: VPU, consumo de cimento e relação a/c que impactam na

resistência à compressão do concreto. Uma RNA é uma espécie de modelo de *machine learning* que é capaz de aprender a partir de um conjunto de dados de entrada e de saída, baseado na estrutura e operação do cérebro humano, sendo formada por camadas de nós comunicativos, ou “neurônios”, que processam e enviam dados (Dinesh *et al.*, 2023; Almasaeid; Suleiman; Alawneh, 2022). Recentemente, diversos pesquisadores tem aplicado RNA para avaliar o comportamento do CRF (Ikumi *et al.*, 2021; Congro *et al.*, 2021; Suganya; Gowsalyaa; Theenathayalan, 2022; Sivasubramanian *et al.*, 2022; Mahesh; Sathyan, 2022; Hossain; Uddin; Hossain, 2023).

Desse modo, o objetivo geral do presente trabalho é: analisar as correlações entre as propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e velocidade de propagação de onda ultrassônica em concretos reforçados com fibras de aço através da análise de resultados experimentais disponíveis na literatura; avaliar relações entre VPU e resistência à compressão do concreto baseado em modelos propostos por pesquisadores; e identificar quais variáveis quando associadas com a velocidade de pulso ultrassônico, auxiliam na estimativa da resistência à compressão adotando a técnica de rede neural artificial.

Método

Seleção dos trabalhos

A metodologia do presente estudo, para selecionar os trabalhos sobre propriedades mecânicas e velocidade de propagação de onda ultrassônica de concreto com fibras de aço, consistiu em realizar uma revisão sistemática da literatura baseado no método proposto por Pagani, Kovalski e Resende (2015). Consultou-se as bases de dados *Science Direct* e *Scopus* através de aplicação de filtros nos sistemas de busca e adoção de combinações de palavras-chave, de modo a coletar os trabalhos mais representativos do tema. As combinações de palavras-chave adotadas foram:

- (a) (“FRC” OR “fiber reinforced concrete”) AND “steel fibers” AND “compressive strength”;
- (b) (“FRC” OR “fiber reinforced concrete”) AND “steel fibers” AND (“modulus of elasticity” OR “elastic modulus”);
- (c) (“FRC” OR “fiber reinforced concrete”) AND “steel fibers” AND “compressive strength” AND (“elastic modulus” OR “modulus of elasticity”); e
- (d) (“FRC” OR “fiber reinforced concrete”) AND “steel fibers” AND (“ultrasonic test” OR “ultrasonic pulse velocity”).

O resultado, contemplado pelas palavras-chave, estão apresentados na Tabela 1 e resultaram na seleção de 22 artigos com dados compatíveis para correlações.

Os dados experimentais dos artigos foram extraídos e organizados com as seguintes taxas de fibra de aço: 0, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%. Além de ser dividido em concretos com resistência até 50 MPa e acima de 55 MPa, que são concretos considerados de alta resistência segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015).

Seleção de modelos para aplicação em banco de dados

Para avaliar as relações entre a VPU e a resistência à compressão do concreto, selecionou-se equações propostas por pesquisadores (Quadro 1). Desse modo, foi possível determinar correlações entre a propriedade obtida pela aplicação das equações *versus* resultados experimentais.

Previsão da resistência à compressão auxiliada por rede neural

Aplicou-se a técnica de rede neural artificial (RNA) para avaliar quais propriedades, quando associadas com a velocidade de pulso ultrassônico, auxiliam na estimativa da resistência à compressão de concretos reforçados com fibras.

Na Figura 1 apresenta-se o *Perceptron* Multicamadas completo (do inglês *Multilayer Perceptrons* - MLP), que é composto de quatro dados de entrada: velocidade de pulso ultrassônico (VPU) em km/s, consumo de cimento (C) em kg/m³, relação água/cimento (a/c) e volume de fibras (V_f) em %; quatro camadas neurais escondidas e um neurônio de saída - resistência à compressão (f_{cm}), em MPa. A partir deste MLP completo, diferentes configurações são obtidas considerando a combinação dos diferentes dados de entrada (estabelecendo que o VPU deve aparecer em todas as configurações) e a quantidade de neurônios na camada neural escondida (variando de um até a quantidade de dados de entrada).

Tabela 1 - Pesquisas sobre concreto reforçado com fibras com resultados experimentais de propriedades mecânicas e velocidade do pulso ultrassônico

Autores	f_c	f_t	E_c	VPU	$f_c \leq 50$ MPa	$f_c > 50$ MPa	V_f (%)
Altun, Haktanir e Ari (2007)	x	x	x		x		0; 1,25; 2,5
Arjomandi <i>et al.</i> (2023)	x			x	x		0; 0,75; 1,25
Ashrafian <i>et al.</i> (2018)	x			x		x	0; 0,2; 0,3; 0,5
Benaicha <i>et al.</i> (2015)	x		x	x		x	0; 0,5; 1,0; 1,3; 1,5; 2,0; 2,5
Bolat <i>et al.</i> (2014)	x			x	x		0; 0,425
Carrillo, Ramirez e Lizarazo-Marriaga (2019)	x		x	x	x		0; 0,17; 0,4; 0,83
Chu, Li e Kwan (2018)	x		x			x	0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0
Hassan e Jones (2012)	x		x	x		x	2
Hedjazi e Castillo (2020)	x			x	x		0; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5
Jo, Shon e Kim (2001)	x		x		x		0; 0,5; 1,0; 1,5
Lee, Oh e Cho (2015)	x		x		x	x	0,5; 1,0; 1,5; 2,0
Mansur, Chin e Wee (1999)	x		x			x	0; 0,5; 1,0; 1,5
Neves e Almeida (2005)	x		x		x	x	0; 0,38; 0,75; 1,13; 1,5
Nikbin <i>et al.</i> (2022)	x	x	x	x		x	0; 0,25; 0,5; 1,0
Prashant, Nagarnaik e Pande (2011)	x		x	x	x		0; 0,5; 1,0; 1,5
Sabireen <i>et al.</i> (2023)	x	x		x	x		0; 0,75
Shi <i>et al.</i> (2020)	x	x	x		x		0; 0,5; 1; 1,5; 2,0; 3,0
Song e Hwang (2004)	x	x				x	0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0
Suksawang, Wtaife e Alsabbagh (2018)	x		x		x	x	0; 0,5; 0,8; 1,5; 2,0
Tabatabaeian <i>et al.</i> (2017)	x	x		x		x	0; 0,5; 1,0
Thomas e Ramaswamy (2007)	x	x	x		x	x	0; 0,5; 1,0; 1,5
Yazici, Inan e Tabak (2007)	x	x		x	x	x	0; 0,5; 1,0; 1,5

Nota: Legenda:

 f_c : resistência à compressão; f_t : resistência à tração; E_c : módulo de elasticidade; e

VPU: velocidade do pulso ultrassônico; e

 V_f : volume de fibras.

Quadro 1 - Equações propostas de correlação entre resistência à compressão de concreto reforçado com fibras com a velocidade de propagação de onda ultrassônica

Autores	Equações propostas
Hedjazi e Castillo (2020)	$f_c = (-107,07.VPU^2) + (1200,1.VPU) - 3320,3$
Jones (1962)	$f_c = 2,8.e^{0,53.VPU}$
Kheder (1999)	$f_c = (1,2.x10^{-5}).(VPU^{1,7447})$
Mahure <i>et al.</i> (2011)	a) $f_c = (9,502.VPU) - 18,89$
	b) $f_c = (2,701.VPU) + 17,15$
Nash't, A'Bour e Sadoon (2005)	$f_c = 1,19.e^{0,715.VPU}$
Qasrawi (2000)	$f_c = (36,72.VPU) - 129,077$
Raouf e Ali (1983)	$f_c = 2,016.e^{0,61.VPU}$
Tabatabaeian <i>et al.</i> (2017)	$f_c = (9,57.4,48^{V_{sf}}.0,59^{V_{pf}}) \exp[(0,317 - 0,239.V_{sf} + 0,043.V_{pf}).VPU]$

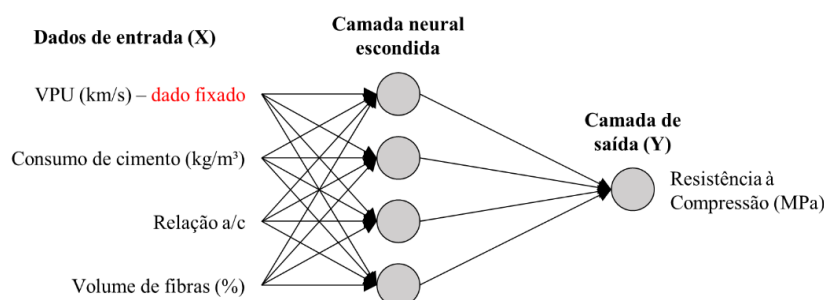
Nota: Legenda:

 f_c : resistência à compressão, em Mpa; E_c : módulo de elasticidade, em Gpa;

VPU: velocidade de propagação de onda ultrassônica, em km/s; e

 V_{sf} e V_{pf} porcentagem de fibras de aço e polipropileno por volume em %, respectivamente.

Figura 1 - Diagrama Perceptron Multicamadas com quatro dados de entrada, uma camada oculta de quatro neurônios e um neurônio de saída



No total, 20 configurações foram treinadas e avaliadas utilizando um banco de dados com 60 grupos. A metodologia utilizada no presente estudo foi adaptada do trabalho de Shaikhina e Khovanova (2017) devido a limitação do banco de dados em relação à baixa quantidade de dados disponíveis. Para cada configuração de RNA, foram conduzidos 50 ciclos de aprendizado supervisionado (treinamento e teste). Durante cada ciclo de aprendizado supervisionado, três fontes de aleatoriedade foram incorporadas:

- divisão aleatória do conjunto de dados em dois subgrupos, sendo 70% dos dados destinados ao treinamento e os restantes 30% para avaliação;
- inicialização aleatória dos pesos e vieses na camada neural escondida; e
- variação aleatória na ordem de apresentação dos dados durante o treinamento e teste.

Consequentemente, os 50 ciclos de aprendizado supervisionado foram distintos entre si, possibilitando uma análise comparativa dos indicadores de desempenho (como coeficiente de determinação, média do erro absoluto e desvio padrão do erro absoluto). Essa abordagem permitiu a identificação do modelo mais eficaz para cada configuração específica da RNA. Considerando todas as configurações, foram executados 1000 treinamentos

O indicador de desempenho para avaliação da RNA ótima foi o coeficiente de determinação (R^2). Este coeficiente quantifica a proporção da variância da força compressiva real (dado experimental obtido durante a revisão da literatura) com a obtida a partir da configuração da RNA adotada.

Resultados e discussões

Correlações entre propriedades

Os resultados de correlação obtidos serão apresentados separadamente para: módulo de elasticidade x resistência à compressão, resistência à tração x resistência à compressão e velocidade de propagação de onda ultrassônica x resistência à compressão.

Módulo de elasticidade x Resistência à compressão

Todos os resultados experimentais foram obtidos após 28 dias de cura, onde os valores do módulo de elasticidade foram determinados através do diagrama tensão x deformação resultante do ensaio de compressão.

Na Figura 2 são apresentados os gráficos de resistência a compressão x módulo de elasticidade contemplando os resultados experimentais bem como valores de referência do módulo de elasticidade inicial determinado a partir das Equações 1 e 2. Ressalta-se que, as Equações 1 e 2 são apresentadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e se referem a concreto sem fibras. A plotagem dos modelos de estimativa em todos os gráficos da Figura 2 serve para enfatizar a diferença de comportamento do concreto com a incorporação das fibras de aço.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \text{ para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa} \quad \text{Eq. 1}$$

$$E_{ci} = 21500 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \text{ para } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde E_{ci} e f_{ck} são em MPa e os valores de α_E dependem do tipo do agregado graúdo.

Adota-se $\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio, $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaiss, $\alpha_E = 0,9$ para calcário e $\alpha_E = 0,7$ para arenito. Destaca-se que a maioria dos dados experimentais não apresentavam indicação do tipo de agregado

empregado, por esse motivo apresentam-se as curvas das estimativas para todas as situações. Além disso, a NBR 6118 (ABNT, 2014) não apresenta estimativa de módulo de elasticidade para concretos com mais de 90 MPa, por isso para todos os volumes de fibras o resultado da norma foi limitado por esse valor.

Analizando a Figura 2a, observa-se que para o concreto sem fibras com resistência até 50 MPa, alguns resultados experimentais apresentam-se dispersos, porém a maioria dentro da faixa de abrangência dos valores de módulo de elasticidade resultantes da aplicação da equação da NBR 6118 (ABNT, 2014) para diferentes tipos de agregado. Para os dois valores experimentais de módulo de elasticidade que estão abaixo da curva de referência $\alpha_E = 0,7$, destaca-se que para o concreto com resistência de 50,1 MPa o agregado graúdo foi um granito e para o concreto com resistência de 42,3 MPa o tipo de agregado graúdo não foi citado no artigo. Eliminando esses dados, a correlação linear entre os resultados experimentais é de 0,90981 (ver Figura 3). Para o concreto sem fibras, com resistência acima de 55 MPa, observa-se que os resultados estão dentro da faixa de resultados, mas não apresentam uma boa correlação linear. Eliminando os valores próximos da curva de curva de referência $\alpha_E = 0,7$, o coeficiente de correlação vai para 0,94026 (ver Figura 3).

Figura 2 - Módulo de elasticidade estático x Resistência à compressão para diferentes volumes de fibras (Continua...)

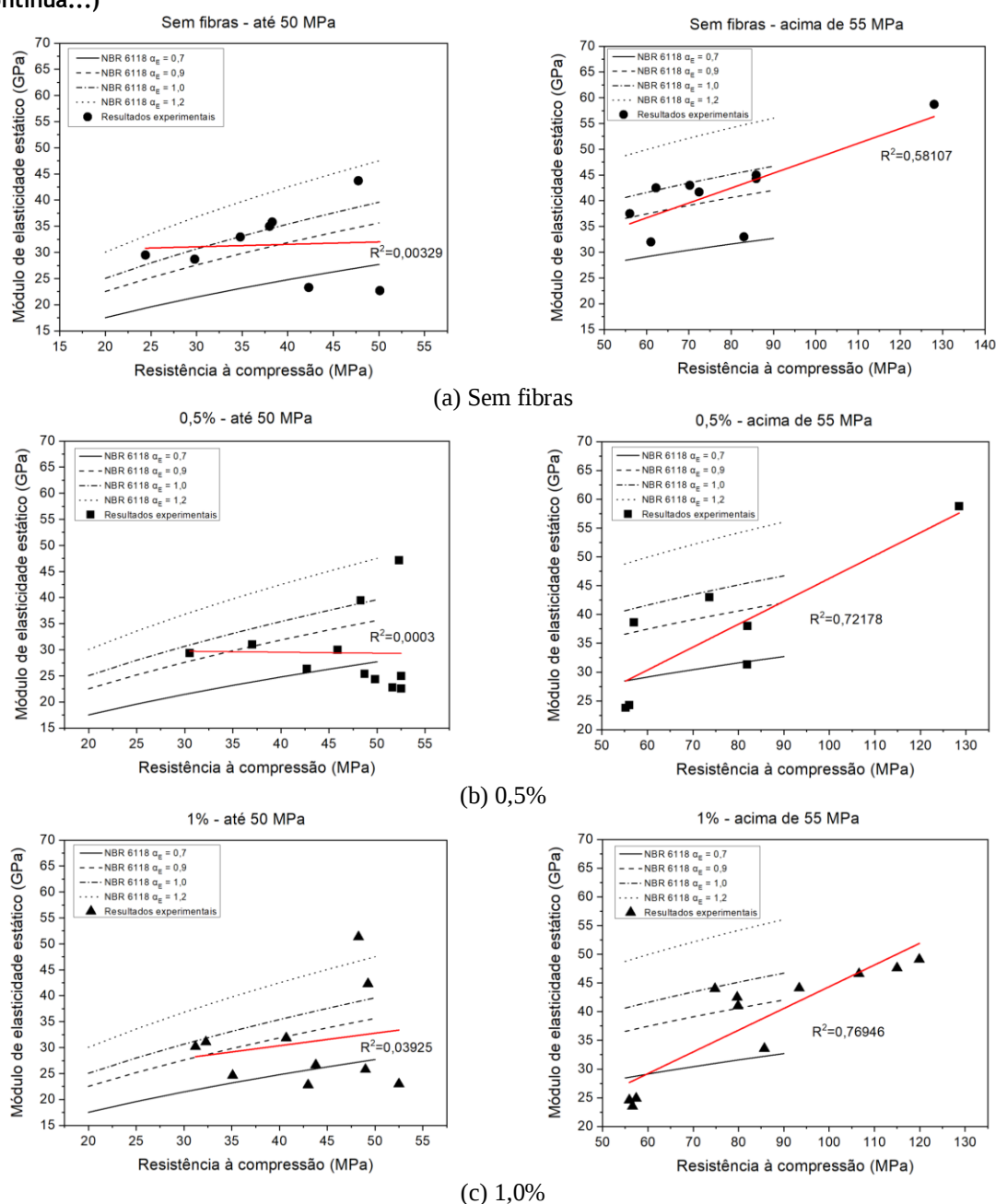


Figura 2 - Módulo de elasticidade estático x Resistência à compressão para diferentes volumes de fibras (continuação)

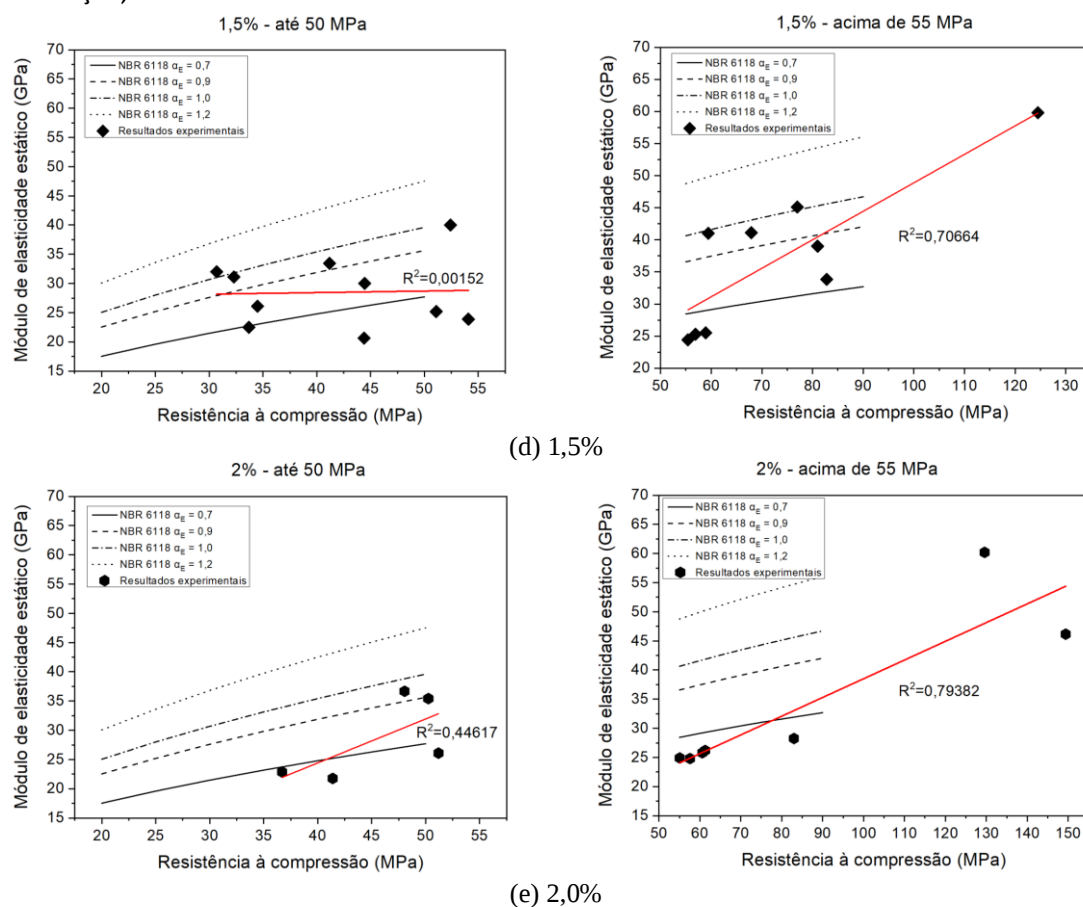
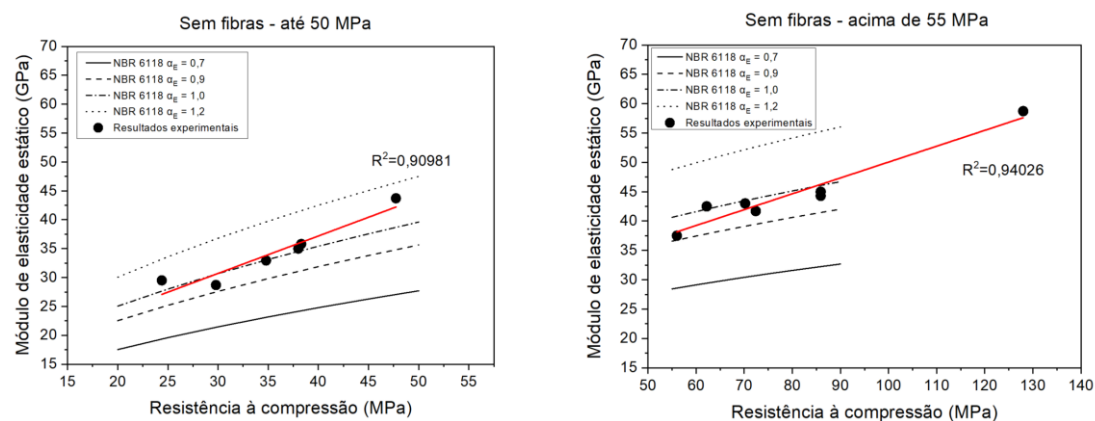


Figura 3 - Módulo de elasticidade estático x Resistência à compressão do concreto sem fibras



Observa-se que, para os demais volumes de fibras, os resultados experimentais dos diversos artigos pesquisados também foram dispersos. Entretanto, é possível observar que para todas as taxas (0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%) a maioria dos valores de módulo de elasticidade estão mais próximos a curva com $\alpha_E = 0,9$ e $\alpha_E = 0,7$, podendo constatar que proporcionalmente os valores de módulo de elasticidade baixaram com a adição de fibras.

Verifica-se ainda, que para todos os volumes de fibras melhores correlações foram obtidas para concretos com resistência à compressão acima de 55 MPa.

Resistência à tração x Resistência à compressão

Todos os resultados experimentais referem-se a ensaios realizados aos 28 dias, sendo os ensaios de resistência à tração realizados por compressão diametral, exceto para o artigo de Shi *et al.* (2020) que apenas cita que foi adotado ensaio uniaxial.

Na Figura 4 são apresentados os gráficos de resistência à tração x resistência à compressão contemplando os resultados experimentais bem como valores de referência da resistência média à tração direta determinados a partir das Equações 3 e 4. Ressalta-se que essas equações são apresentadas pela NBR 6118 (ANT, 2014) e se referem a concreto sem fibras. Estes modelos de estimativa também foram plotados nos gráficos da Figura 4, nos concretos com fibras, para gerar uma comparação do padrão de comportamento em relação ao concreto sem fibras de aço.

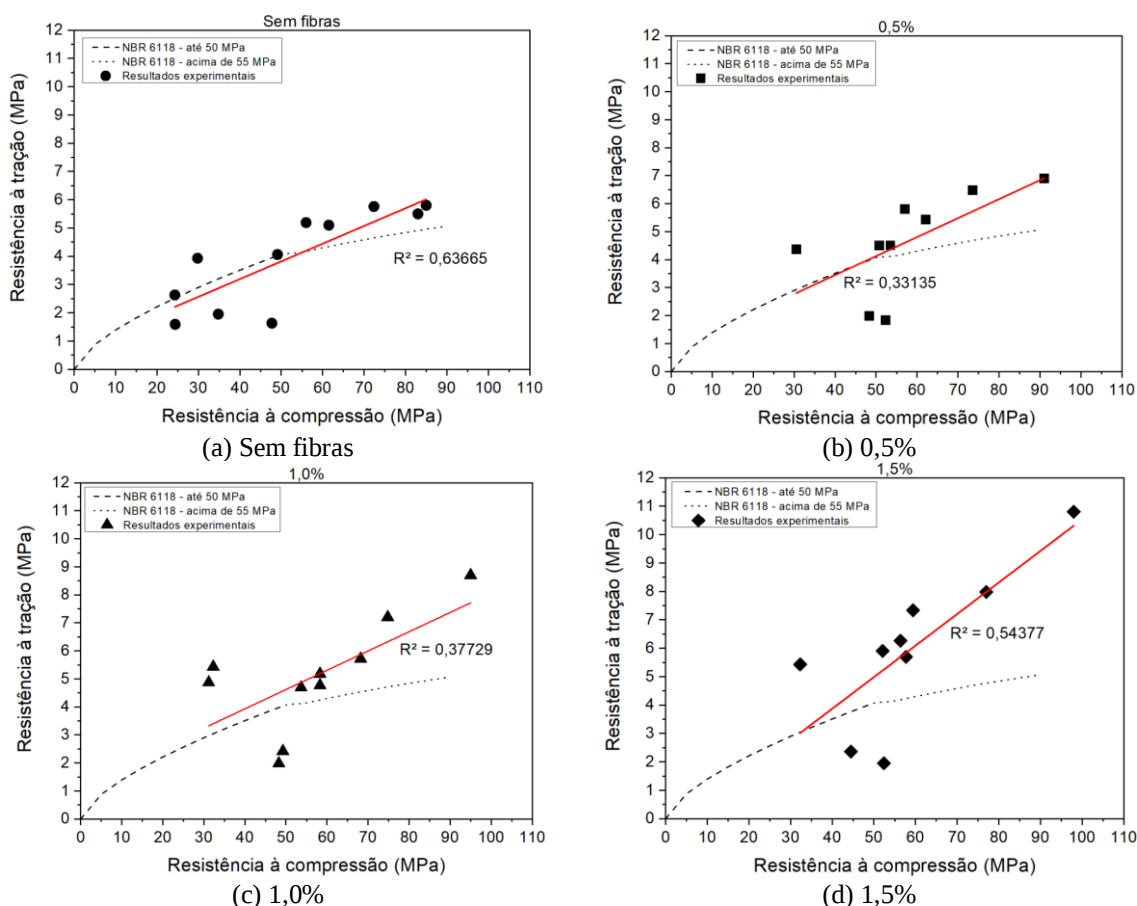
$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \text{ para } f_{ck} \text{ até } 50 \text{ MPa} \quad \text{Eq. 3}$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,11 \cdot f_{ck}) \text{ para } f_{ck} \text{ de } 55 \text{ MPa a } 90 \text{ MPa} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde f_{ctm} e f_{ck} são em MPa.

Observando os resultados experimentais dos ensaios, verifica-se que a melhor correlação foi obtida no concreto sem fibras (Figura 4a), seguido respectivamente do concreto com taxa de 1,5% (Figura 4d), 1,0% (Figura 4c) e 0,5% (Figura 4b). Porém, os resultados foram dispersos, não sendo possível obter uma boa correlação em nenhum volume de fibras. No entanto, observa-se claramente ao comparar os resultados experimentais, com diversos volumes de fibras de aço, que os valores de resistência à tração são maiores no concreto com maior adição de fibras. De fato, essa é uma das principais características e vantagens do emprego de fibras em concreto. É possível observar ainda que, a curva resultante da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) refere-se a concreto sem fibras, portanto os valores experimentais ficaram, em sua maioria, acima dessa referência. Tal fato, não foi observado com os resultados experimentais de Shi *et al.* (2020), sendo que para todas as taxas de fibra, os resultados experimentais ficaram abaixo da curva referência da norma.

Figura 4 - Resistência à tração x Resistência à compressão para concretos com diferentes volumes de fibras



Velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU) x Resistência à compressão

Para os dados experimentais dos artigos que abordaram velocidade de propagação de onda ultrassônica, observou-se que as taxas de fibra de aço adotadas no concreto foram diversas: 0, 0,10%, 0,17%, 0,20%, 0,25%, 0,3%, 0,4%, 0,425%, 0,5%, 0,75%, 0,83%, 1,0%, 1,25%, 1,3%, 1,5%, 2,0% e 2,5%. Tal variação dificultou um agrupamento dos resultados. Além disso, a adoção de diferentes traços de concreto, o modo de leitura com o aparelho de ultrassom: direto, semi-direto e indireto, condições de umidade e data da leitura após a concretagem também influenciaram nos resultados.

A Figura 5 apresenta um panorama geral dos dados extraídos dos artigos quanto a relação de resistência à compressão x VPU (padronizando a escolha de dados efetuados pela leitura direta), referentes a leituras para 7 dias, 28 dias e acima de 28 dias (44, 56 ou 90 dias a depender do artigo).

Na Figura 5, com todos os dados disponíveis de leitura de velocidade do pulso ultrassônico, observa-se uma dispersão bem significativa dos valores obtidos, podendo verificar correlação apenas em algumas regiões. Quanto à evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica após a data da concretagem, observa-se que as maiores velocidades são obtidas em maiores idades.

Com o intuito de refinar a análise e estabelecer uma possível correlação da resistência à compressão com a velocidade de propagação de onda ultrassônica, foram considerados os resultados apenas para os mesmos volumes de fibras. A Figura 6 apresenta os dados para o concreto sem fibras (Figura 6a), 0,5% (Figura 6b), 1,0% (Figura 6c) e 1,5% (Figura 6d), com a leitura de ultrassom aos 28 dias. As quantidades de pontos não são as mesmas para os quatro gráficos apresentados, pois cada artigo analisado adotou diferentes volumes de fibra, sendo que apenas para o concreto sem fibras é que todos os artigos estão representados.

Observa-se na Figura 6 que as correlações iniciais obtidas para os resultados experimentais entre VPU x resistência à compressão foram bem baixas, sendo de 0,2367; 0,02487; 0,01405 e 0,27239 para os concretos sem fibras, 0,5%, 1,0% e 1,5%, respectivamente.

Para o concreto sem fibras, dois pontos resultaram em velocidades de aproximadamente 5800 m/s, sendo que nesses dois artigos o tipo da leitura realizada para definição da velocidade não foi informado. Se for eliminado estes dois dados, a correlação linear seria de 0,68452 (ver Figura 7a). Para o concreto com taxa de 0,5% os resultados referem-se a sete artigos, onde os resultados estão bem dispersos. Eliminando os valores obtidos no estudo de Tabatabaeian *et al.* (2017) e de Hedjazi e Castillo (2020) que resultaram em maiores velocidades proporcionalmente a resistência à compressão, a correlação linear é de 0,54011 (ver Figura 7b). Para o volume de 1,0% os resultados contemplam apenas seis artigos, a mesma quantidade para o volume de 1,5%. Não se obteve mais dados para essas taxas, pois os demais artigos consultados tinham volumes de fibras adotados diferentes. No volume de 1,0% se for eliminado os dados que apresentaram menores valores VPU a correlação linear é de 0,63735 (ver Figura 7c). Para o volume de 1,5%, eliminando o resultado do artigo de Hedjazi e Castillo (2020), a correlação obtida é de 0,71879 (ver Figura 7d).

Figura 5 - VPU x Resistência à compressão para concretos com volume de fibras variando entre 0 e 2,5% e com leitura VPU em três idades

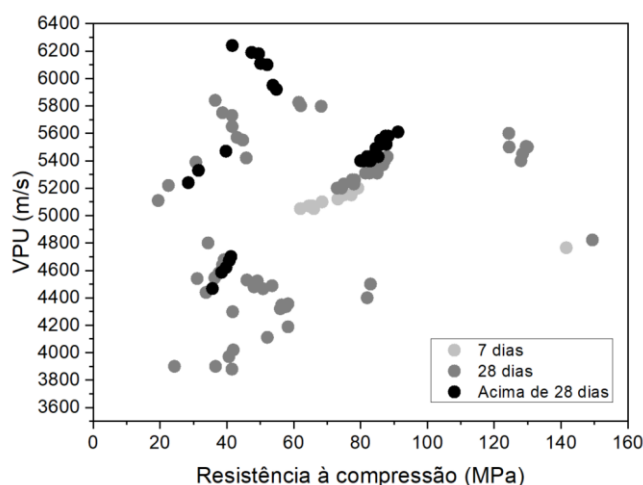


Figura 6 - VPU x Resistência à compressão para concretos

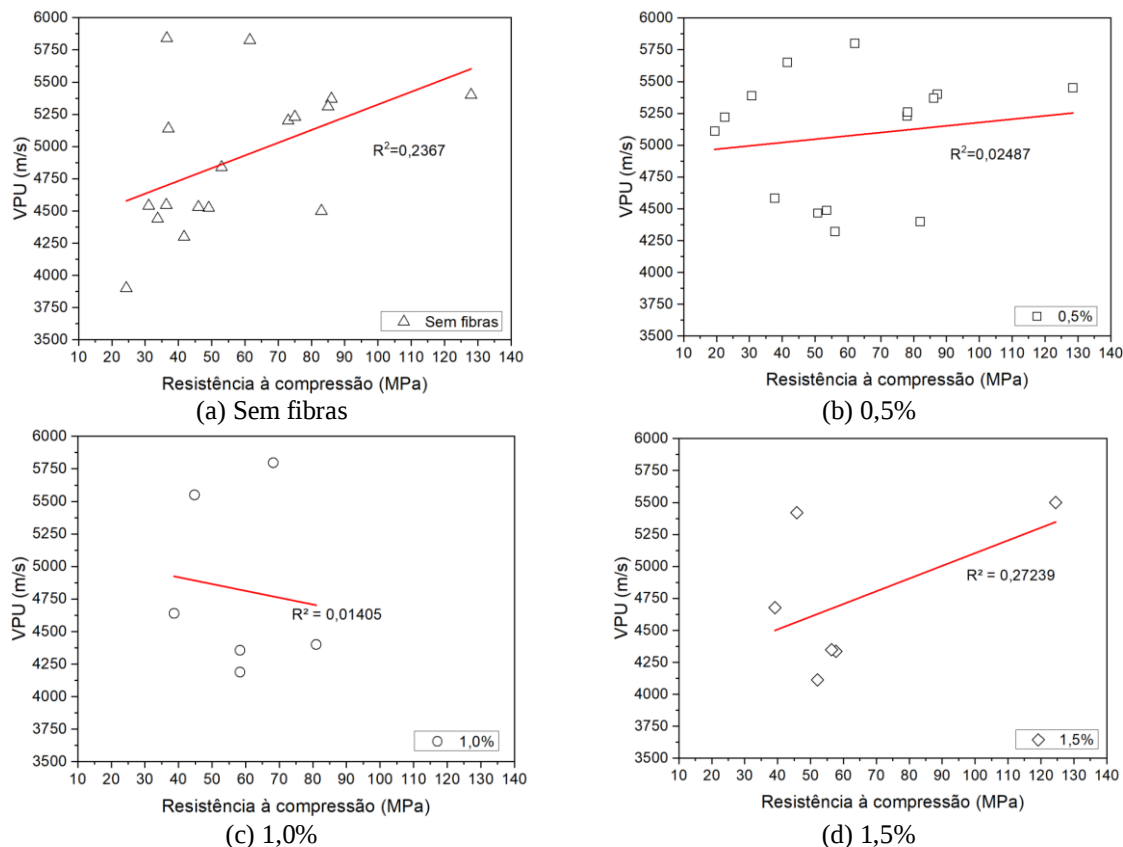
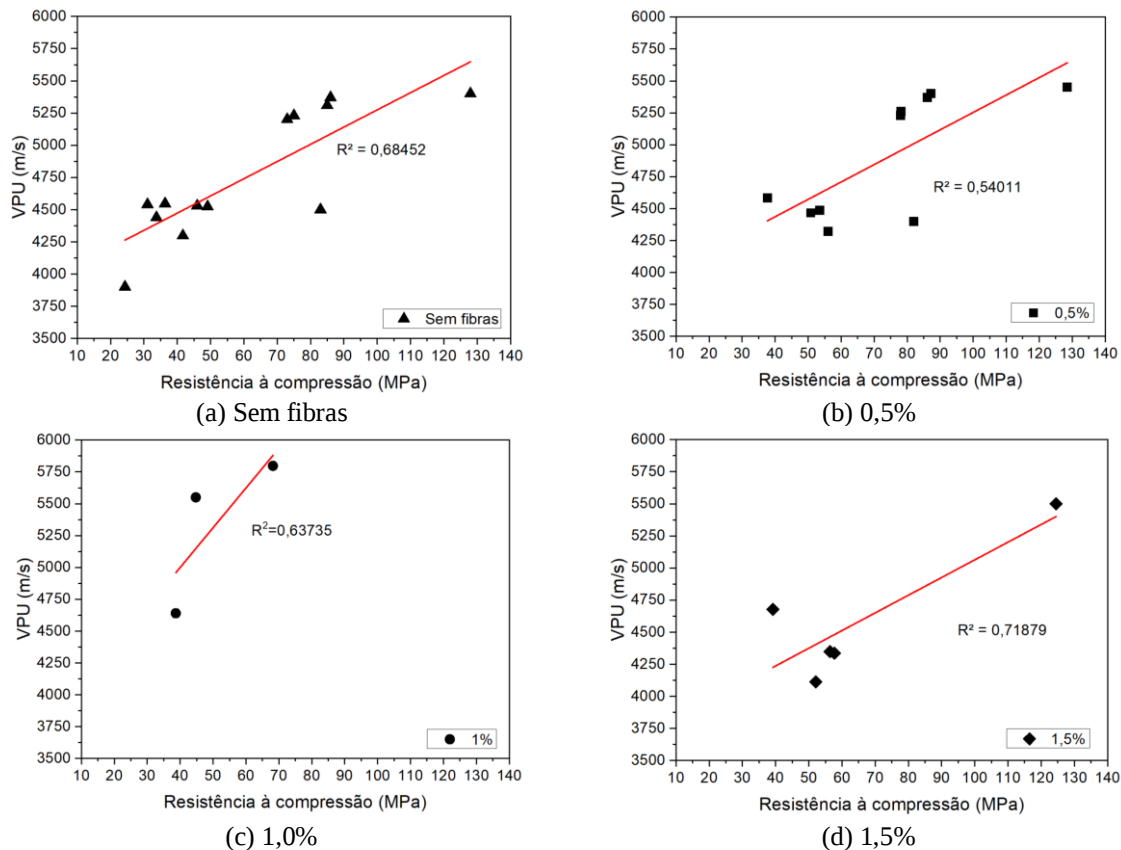


Figura 7 - VPU x Resistência à compressão para concretos, com correlação



Com os ajustes propostos, verifica-se que foi possível uma melhor correlação entre os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica $\times$ resistência à compressão. Entretanto, é possível observar que não existem muitos estudos de aplicação do ensaio não destrutivo de velocidade de propagação de onda ultrassônica em concreto com fibras. E nos artigos consultados as taxas de fibras adotadas, por cada autor, é bem variada, sendo difícil estabelecer uma correlação.

Resistência à compressão obtida por equações versus valores experimentais

Considerando os resultados experimentais de velocidade de propagação de onda ultrassônica, foi realizada a aplicação das equações propostas na literatura e informadas no Quadro 1. A Figura 8 apresenta o gráfico entre a resistência à compressão obtida pelas equações $\times$ a resistência à compressão obtida experimentalmente.

Em análise a Figura 8, observa-se que a relação não foi satisfatória para correlação, o que indica que tais equações não são modelos adequados para previsão de propriedades mecânicas (resistência à compressão) de concretos com fibras. Desse modo, é necessário maiores estudos para o entendimento e aplicação dos resultados obtidos e a proposição de futuros modelos cuja eficiência seja comprovada para correlações.

Previsão da resistência à compressão auxiliada por rede neural

Análises

Na Figura 9 podem ser observados os resultados de R^2 para cada uma das configurações de RNAs avaliadas. Analisando as 20 configurações de RNAs (ressalta-se novamente que todas as configurações estudadas contam com pelo menos o VPU como dado de entrada – ver Figura 9a), verifica-se que o R^2 varia de 0,211 até 0,988. Essa variação indica que algumas configurações analisadas não representam bem o comportamento físico analisado.

Deste modo, foram analisadas a influência de cada um dos outros dados de entrada: consumo de cimento (C) – Figura 9b; relação água/cimento (a/c) – Figura 9c; volume de fibras (V_f) – Figura 9d. Em cada análise, foram calculados os valores médios de R^2 com as considerações com e sem o dado de entrada em estudo.

Observa-se na Figura 9b que o R^2 médio das configurações sem o dado de entrada “consumo de cimento” foi de 0,504 e aumentou para 0,664 (melhora de 131,76 %) ao avaliar as configurações que apresentavam como um de seus dados de entrada o “consumo de cimento”. A consideração do dado de entrada “a/c” foi a que apresentou o efeito mais significativo na performance da RNA, apresentando um aumento no valor médio de R^2 de 0,352 para 0,765 (melhora de 217,25 %). Por outro lado, os resultados do dado de entrada “ V_f ” foi o que não apresentou benefício na performance da RNA, reduzindo o valor médio do R^2 de 0,611 para 0,593 (piora de 2,93 %).

Figura 8 - Resistência à compressão obtida pelas equações propostas na literatura $\times$ resistência à compressão experimental

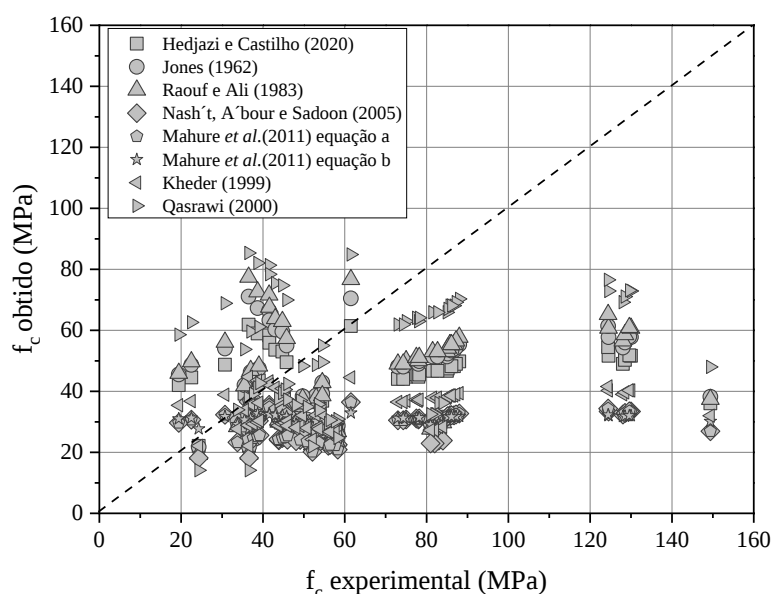
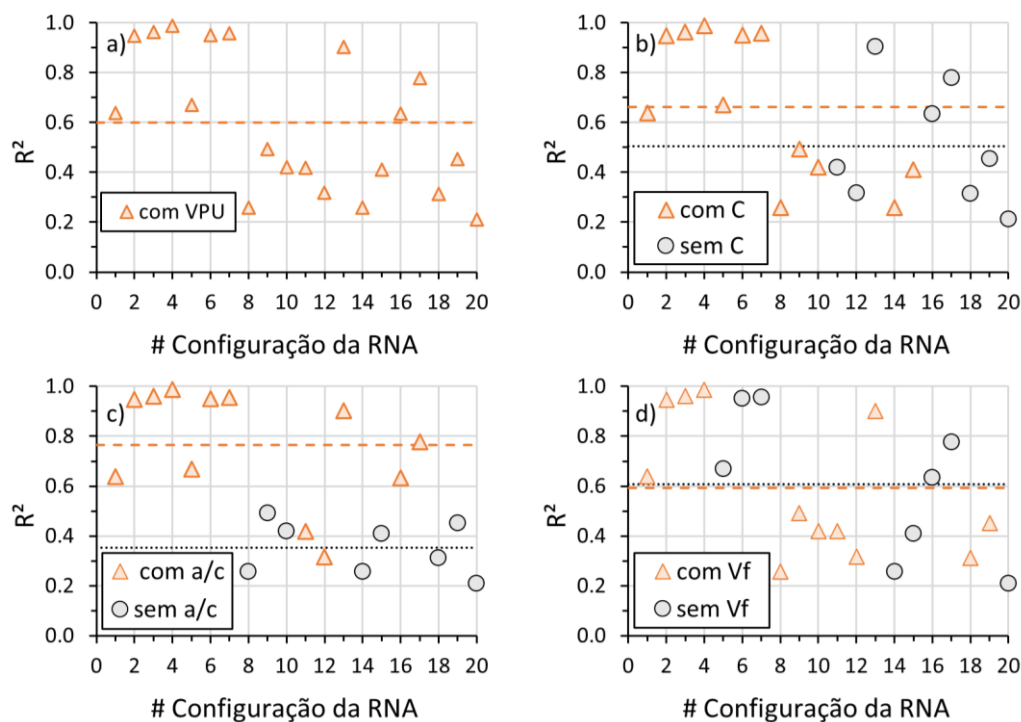


Figura 9 - Efeito dos dados de entrada na performance da RNA



Segundo Ikumi *et al.* (2021), a baixa relevância (baixa diferença entre os valores médios de R^2 - por exemplo o encontrado no dado de entrada “ V_f ”) detectada para um dado de entrada não significa necessariamente que ele não é relevante para o dado de saída. A baixa relevância pode indicar que o dado de entrada fornece uma informação redundante, isto é, que já foi contemplada por outro dado de entrada.

Modelo final

Na Figura 10 pode ser observada a configuração ótima da RNA (modelo final), que corresponde ao modelo como maior valor de R^2 (0,973). O modelo final descrito pela Equação 6 utiliza três dados de entrada (VPU, consumo de cimento e relação a/c), três neurônios na camada escondida e um dado de saída (resistência à compressão).

A função de ativação dos neurônios da camada neural escondida utilizada foi a Tansig (representada na Equação 5), enquanto a função de transformação Purelin foi a selecionada para os dados de saída. As matrizes numéricas dos pesos da camada de entrada (W1), da camada oculta (W2), juntamente com os enviesamentos correspondentes (B1, B2) da configuração ótima da RNA, são mostradas nas Equações 7, 8, 9 e 10.

$$y_n = B2 + W2 \cdot \text{tansig}(B1 + W1 \cdot x_n) \quad \text{Eq. 5}$$

$$\text{tansig}(x) = \frac{2}{(1 + e^{-2x}) - 1} \quad \text{Eq. 6}$$

$$W1 = \begin{Bmatrix} 0,9558 & -1,2081 & 1,3239 \\ -0,4922 & 2,2707 & 0,3081 \\ -0,4000 & 2,9123 & 0,6023 \end{Bmatrix} \quad \text{Eq. 7}$$

$$W2 = \{-1,5019 \quad -15,3021 \quad 24,1842\} \quad \text{Eq. 8}$$

$$B2 = \{-9,2399\} \quad \text{Eq. 9}$$

$$B1 = \begin{Bmatrix} 0,6134 \\ 1,9944 \\ 2,7847 \end{Bmatrix} \quad \text{Eq. 10}$$

Na Figura 11 pode-se observar os resultados obtidos por equações propostas na literatura (já apresentadas na Figura 8) em conjunto com os resultados obtidos pela configuração ótima da RNA (Equação 5). Este modelo apresentou uma acurácia (média do erro absoluto) de 3,18 MPa e uma precisão (desvio padrão amostral do erro absoluto) de 3,803 MPa.

Figura 10 - Modelo de RNA final

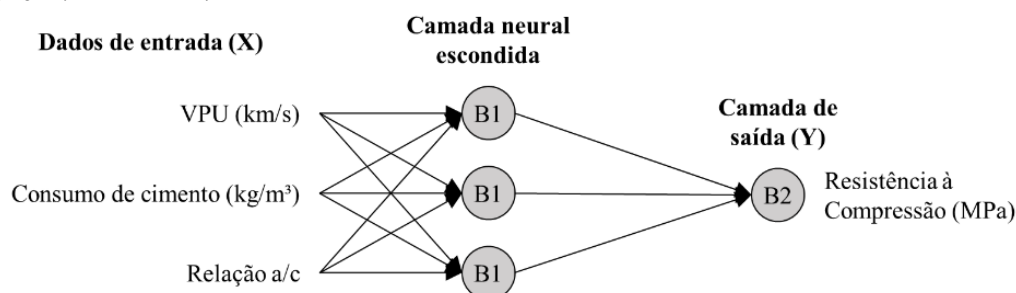
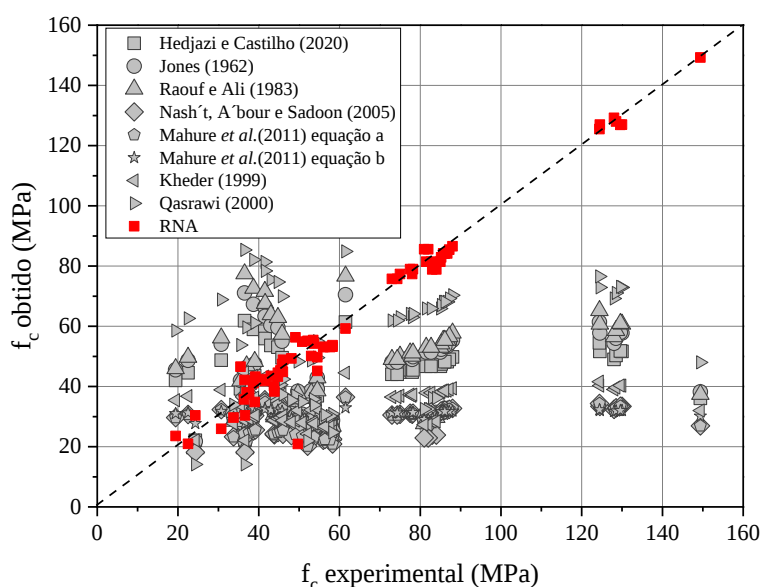


Figura 11 - Resistências à compressão obtida pelas equações extraídas da literatura e pela configuração ótima da RNA



Considerações finais

Por meio dos resultados obtidos, de modo geral, pode-se verificar que os dados encontrados na literatura, no que diz respeito às propriedades de concretos reforçados com fibras, são bastante variados, o que dificultou a determinação de correlações. Nos artigos consultados foram verificados os resultados de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e velocidade de propagação de onda ultrassônica e observou-se diversas variáveis que influenciaram os resultados, tais como tipo de cimento, teor de fibras, razão de aspecto da fibra, modo de leitura da velocidade de propagação de onda ultrassônica (direto, semi-direto e indireto), tipo de cura dos concretos, tipos de corpos de prova, a forma e mineralogia dos agregados, entre outros.

Foi observada uma boa correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade para o concreto sem fibras, bem como para os FRC de alta resistência. Destaca-se que nos artigos consultados os volumes de fibras adotados, por cada autor, são bem variados, sendo difícil estabelecer uma correlação. A utilização de equações para obter estimativas de previsibilidade de propriedades de concretos reforçados com fibras através da velocidade de propagação de onda ultrassônica não indicaram resultados próximos do real. Isso mostra que os modelos necessitam ser revistos quanto à sua aplicabilidade, uma vez que foram desenvolvidos em concretos dos próprios estudos, de modo que a alta variabilidade de dados de velocidade de propagação de onda ultrassônica obtidos na literatura não representam, de modo correlacionado, as propriedades reais versus as obtidas pelos modelos.

Para aprimorar a análise, um modelo de RNA para estimar a resistência à compressão de concretos reforçados com fibras quando associado a velocidade de pulso ultrassônico foi avaliado. Desse modo, concluiu-se que a configuração ótima da RNA (modelo final), que teve uma melhor correlação, utilizou os seguintes dados de

entrada: VPU, consumo de cimento e relação a/c, bem como três neurônios na camada escondida e um dado de saída (resistência à compressão).

Ainda, a publicação de novos trabalhos sobre os temas, além da aplicação de outros ensaios não destrutivos (como, por exemplo, esclerometria ou *pull off*) poderia aumentar o banco de dados e promover estudos mais aprimorados sobre a correlação de propriedades de concretos reforçados com fibras.

Referências

- AFROUGHSABET, V.; BIOLZI, L.; OZBAKKALOGLUN, T. High-performance fiber-reinforced concrete: a review. **Journal of Materials Science**, v. 51, p. 6517-6551, 2016.
- ALMASAEID, H. H.; SULEIMAN, A.; ALAWNEH, R. Assessment of high-temperature damaged concrete using non-destructive tests and artificial neural network modelling. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e01080, 2022.
- ALTUN, F.; HAKTANIR, T.; ARI, K. Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 3, p. 654-661, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 597-16**: standard test method for pulse velocity through concrete. West Conshohocken, 2016.
- ARJOMANDI, A. *et al.* The effect of sulfuric acid attack on mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete containing waste nylon aggregates: Experiments and RSM-based optimization. **Journal of Building Engineering**, v. 64, p. 105500, 2023.
- ASHRAFIAN, A. *et al.* Prediction of compressive strength and ultrasonic pulse velocity of fiber reinforced concrete incorporating nano silica using heuristic regression methods. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 479-494, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- BENAICHA, *et al.* Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 702-709, 2015.
- BOLAT, H. *et al.* The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. **Composites Part B**, v. 61, p. 191-198, 2014.
- CARRILLO, J.; RAMIREZ, J.; LIZARAZO-MARRIAGA, J. Modulus of elasticity and Poisson's ratio of fiber-reinforced concrete in Colombia from ultrasonic pulse velocities. **Journal of Building Engineering**, v. 23, p. 18-26, 2019.
- CHU, S. H.; LI, L. G.; KWAN, A. K. H. Fibre factors governing the fresh and hardened properties of steel FRC. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 1228-1238, 2018.
- CONGRO, M. *et al.* Prediction of the residual flexural strength of fiber reinforced concrete using artificial neural networks. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124502, 2021.
- DINESH, A. *et al.* Prediction of strength characteristics of cement composite using artificial neural network. **Materials Today: Proceedings**, 2023.
- HASSAN, A. M. T.; JONES, S. W. Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): a feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 361-367, 2012.
- HEDJAZI, S.; CASTILLO, D. Relationships among compressive strength and UPV of concrete reinforced with different types of fibers. **Heliyon**, v. 6, p. e03646, 2020.
- HOSSAIN, M.; UDDIN, N.; HOSSAIN, A.S. Prediction of compressive strength ultra-high steel fiber reinforced concrete (UHSFRC) using artificial neural networks (ANNs). **Materials Today: Proceedings**, 2023.
- IKUMI, T. *et al.* Neural network-aided prediction of post-cracking tensile strength of fibre-reinforced concrete. **Computers & Structures**, v. 256, 106640, 2021.

- JO, B-W.; SHON, Y-H.; KIM, Y-J. The evaluation of elastic modulus for steel fiber reinforced concrete. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, v. 37, p. 152-161, 2001.
- JONES, R. **Nondestructive Testing of Concrete**. London: Cambridge University Press, 1962.
- KHEDER, G. A two-stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing. **Materials and Structures**, v. 32, p. 410-417, 1999.
- LEE, S. C.; OH, J. H.; CHO, J. Y. Compressive behavior of fiber-reinforced concrete with end-hooked steel fibers. **Materials**, v. 8, p. 1442-1458, 2015.
- MAHESH, R. R., M.; SATHYAN, D. Modelling the hardened properties of steel fiber reinforced concrete using ANN. **Materials Today: Proceedings**, v. 49, p. 2081–2089, 2022.
- MAHURE, N. V. *et al.* Correlation between pulse velocity and compressive strength of concrete. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, v. 4, n. 6, p. 871-874, 2011.
- MANSUR, M. A.; CHIN, M. S.; WEE, T. H. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 11, p. 21–29, 1999. OK
- NASH'T, I. H.; A'BOUR. S. H.; SADOON, A. A. **Finding an unified relationship between crushing strength of concrete and non-destructive tests**. In: MIDDLE EAST NONDESTRUCTIVE TESTING CONFERENCE & EXHIBITION, 3., Bahrain, 2005. **Proceedings [...]** Bahrain, 2005.
- NEMATZADEH, M.; TAYEBI, M.; SAMADVAND, Hl. Prediction of ultrasonic pulse velocity in steel fiber-reinforced concrete containing nylon granule and natural zeolite after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121958, 2021.
- NEVES, R. F.; ALMEIDA, J. C. O. F de. Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete. **Structural Concrete**, v. 6, n. 1, p.1-8, 2005.
- NIKBIN, I. M. *et al.* Life cycle assessment and mechanical properties of high strength steel fiber reinforced concrete containing waste PET bottle. **Construction and Building Materials**, v. 337, p. 127553, 2022.
- PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordination: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 2015.
- PRASHANT Y. P.; NAGARNAIK, P. B.; PANDE, A. M. Performance of steel fiber on standard strength concrete in compression. **International Journal of Civil and Structural Engineering**, v. 2, n. 2, p. 483-492, 2011.
- QASRAWI, H. Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 739-746, 2000.
- RAOUF, Z.; ALI, Z. Assessment of concrete characteristics at an early age by ultrasonic pulse velocity. **Journal of Building Research**, v. 2, p. 31-44, 1983.
- SABIREEN, B. *et al.* Mechanical performance of fiber-reinforced concrete and functionally graded concrete with natural an, d recycled aggregates. **Ain Shams Engineering Journal**, p. 102121, 2023.
- SHAIKHINA, T.; KHOVANOVA, N. A. Handling limited datasets with neural networks in medical applications: a small-data approach. **Artificial Intelligence in Medicine**, v. 75, p. 51-63, 2017.
- SHI, X. *et al.* Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension. **Construction and Building Materials**, v. 233, 117316, 2020.
- SIVASUBRAMANIAN, A. *et al.* Experimental validation of compressive strength prediction using machine learning algorithm. **Materials Today: Proceedings**, v. 64, p. 181–187, 2022.
- SONG, P. S.; HWANG, S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 669-673, 2004.
- SUGANYA, R.; GOWSALYAA, R.; THEENATHAYALAN, R. Prediction of shear strength for steel fiber reinforced concrete using machine learning techniques. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 4370–4373, 2022.
- SUKSAWANG, N.; WTAIFE, S. ALSABBAGH, A. Evaluation of elastic modulus of fiber-reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, n. 115, p. 239-249, 2018.

TABATABAEIAN, M. *et al.* Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 497–509, 2017.

THOMAS, J.; RAMASWAMY, A. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. **Journal Materials Civil Engineering**, v. 19, n.5, p. 385-392, 2007.

TRTNIK, G.; KAVČIČ, F.; TURK, G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. **Ultrasonics**, v. 49, n. 1, p. 53–60, 2009.

TSIOULOU, O.; LAMPROPOULOS, A.; PASCHALIS, S. Combined non-destructive testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 66–77, 2017.

XU, B. W.; SHI, H. S. Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 3468–3474, 2009.

YAZICI, Ş.; INAN, G.; TABAK, V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1250-1253, 2007.

Gabriela Mazureki Campos Bahniuk

Conceitualização, Curadoria dos dados, Análise dos dados, Pesquisa, Metodologia, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Estudos em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | Av. Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100 | Curitiba - PR - Brasil | CEP 81530-000

Engenharia Civil | Universidade Estadual de Ponta Grossa | Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 | Ponta Grossa - PR - Brasil | CEP 84030-900 | Tel.: (42) 99981-7707 | E-mail: gabriela.campos@uepg.br

Eduardo Rigo

Conceitualização, Curadoria dos dados, Análise dos dados, Pesquisa, Metodologia, Redação do manuscrito original.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Av. Tancredo Neves, 6731 | Foz do Iguaçu - PR - Brasil | CEP 85867-970 | Tel.: (45) 99107-0064 | E-mail: eduardorigo.e@gmail.com

Ricardo Pieralisi

Conceitualização, Curadoria dos dados, Análise dos dados, Pesquisa, Metodologia, Supervisão, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Estudos em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | Tel.: (41) 3361-3436 | E-mail: ricpieralisi@ufpr.br

Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Conceitualização, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Estudos em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | Tel.: (41) 99814-3035 | E-mail: medeiros.ufpr@gmail.com

Roberto Dalledone Machado

Conceitualização, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Estudos em Engenharia Civil | Universidade Federal do Paraná | Tel.: (41) 3361-3436 | E-mail: rdm@ufpr.br

Editores: Ercília Hitomi Hirota, Juliana Parise Baldauf e Eduardo Pereira

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.