

doi <https://doi.org/10.18265/2447-9187a2022id7741>

ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 25/05/2023

APROVADO 24/09/2023

PUBLICADO ON-LINE 06/10/2023

VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 30/01/2025

EDITORA ASSOCIADA

Profa. Dra. Nelma Mirian Chagas de Araújo

# Ensaaios não destrutivos aplicados ao concreto reforçado com fibras de aço: correlações com as propriedades mecânicas

 Mikael Milam da Silva <sup>[1]</sup>

 Rodolfo Coleone Sanvezzo <sup>[2]</sup>

 Vladimir José Ferrari <sup>[3]</sup> ✱

[1] mikamilam@hotmail.com

[2] eng.rodolfocoleone@gmail.com

[3] vladimirjf@hotmail.com

Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Paraná, Brasil

✱ Autor para correspondência.

**RESUMO:** O concreto é amplamente utilizado na construção civil brasileira, entretanto, seu comportamento sob a ação de esforços de tração é insatisfatório. A introdução de fibras de aço no concreto melhora suas propriedades de tração, principalmente devido ao efeito ponte das fibras. No Brasil, após a publicação em 2021 das normas sobre concreto reforçado com fibras (CRF), espera-se um aumento gradual na aplicação desse material na construção. Nesse sentido, o controle de qualidade do CRF para uso como material estrutural e a avaliação do desempenho desse material são fundamentais para sua disseminação. Embora existam diversas pesquisas relacionadas às propriedades do CRF, ainda são escassos os estudos que estabelecem correlações entre as propriedades mecânicas do CRF e os parâmetros obtidos por Ensaios Não Destrutivos (END). Este estudo aplicou ENDs, como a velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU), a dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão (IE) e o módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração ( $E_d$ ), em concretos reforçados com fibras de aço (CRFA). Foram investigados três teores de fibras de aço (0,35%, 0,70% e 1,05%) em um mesmo traço de concreto de classe C30. O objetivo foi estabelecer curvas de correlação entre os resultados dos ENDs e as propriedades mecânicas do material, como a compressão axial ( $f_c$ ) e o módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ). Os resultados indicaram que o método da VPU foi o mais eficaz na estimativa da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos analisados. Os valores do módulo dinâmico foram superiores aos do módulo estático, com a diferença diminuindo com o avanço da idade do concreto. De maneira geral, os resultados obtidos demonstram boa assertividade das equações para estimar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos.

**Palavras-chave:** compressão axial; concreto reforçado com fibras de aço; correlações; ensaios não destrutivos; módulo de elasticidade.



# Non-destructive testing applied to steel fiber-reinforced concrete: correlations with mechanical properties

**ABSTRACT:** Concrete is widely used in Brazilian civil construction, however, its performance under tensile stress is unsatisfactory. The introduction of steel fibers in concrete improves its tensile properties, mainly due to the bridging effect of the fibers. In Brazil, following the publication of standards related to fiber-reinforced concrete (FRC) in 2021, a gradual increase in the application of this material in construction is expected. In this context, quality control of FRC for structural use and the evaluation of its performance are crucial for its widespread adoption. Although numerous studies have analyzed the properties of FRC, research establishing correlations between the mechanical properties of FRC and parameters obtained from Non-Destructive Testing (NDT) remains scarce. This study applied NDTs, such as ultrasonic pulse velocity (UPV), surface hardness using the rebound hammer (RH), and dynamic modulus of elasticity using the natural frequency method ( $E_d$ ) to steel fiber-reinforced concrete (SFRCs). Three different steel fiber contents (0.35%, 0.70%, and 1.05%) in a C30 class concrete mix were investigated. The objective was to establish correlation curves between the NDT results and the mechanical properties of the material, including axial compression strength ( $f_c$ ) and static modulus of elasticity ( $E_c$ ). The results indicated that the UPV method was the most effective in estimating the analyzed concretes' compressive strength and modulus of elasticity. The dynamic modulus values were higher than the static ones, with the difference decreasing as the concrete aged. Overall, the results demonstrated good accuracy of the equations for estimating the concretes' compressive strength and modulus of elasticity.

**Keywords:** axial compression; correlations; modulus of elasticity; non-destructive testing; steel fiber-reinforced concrete.

## 1 Introdução

O concreto é amplamente utilizado na construção civil brasileira devido a diversos fatores, entre eles, o baixo custo dos materiais e da produção, além de seu excelente desempenho quando solicitado à compressão. Entretanto, seu comportamento sob esforços de tração é insatisfatório, apresentando uma resistência geralmente em torno de 1/10 da resistência à compressão. A matriz cimentícia do concreto apresenta baixa resistência e pouca capacidade de deformação quando submetida a esforços de tração. Por esse motivo, em estruturas de concreto armado, a resistência à tração do concreto é desconsiderada para o dimensionamento dos elementos estruturais, sendo adicionadas barras de aço nas regiões tracionadas.

O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) é um material que vem despertando crescente interesse na comunidade técnica devido à melhoria das propriedades da matriz cimentícia quando submetida a esforços de tração. O CRF insere-se no conceito de reforço do concreto pelo efeito de ponte de tensões gerado pela presença das fibras, o que possibilita o controle da abertura e da propagação das fissuras. As fibras promovem uma alteração significativa no comportamento mecânico do concreto após a fissuração,

umentando a capacidade de absorção de energia do material (energia de fraturamento, energia de fissuração e tenacidade) e sua ductilidade. A aplicação de fibras de aço melhora a capacidade de carga e de deformação do concreto, mantendo uma capacidade portante pós-fissuração e deformações maiores quando comparada ao desempenho referente à matriz cimentícia isoladamente (Ferrari; Hanai, 2009, 2011).

No Brasil, em 2021, foi publicado um conjunto de normas técnicas relacionadas ao CRF, destacando-se a NBR 16935 (ABNT, 2021e) e a NBR 16938 (ABNT, 2021f), referentes ao projeto de estruturas e ao controle de qualidade do CRF, respectivamente, bem como a NBR 16940 (ABNT, 2021h) e a NBR 16939 (ABNT, 2021g), relativas aos ensaios de caracterização do material por flexão e duplo puncionamento, respectivamente. Com a publicação dessas normas e a regulamentação dos requisitos de desempenho mecânico para estruturas de CRF, atuando isoladamente ou em conjunto com as armaduras convencionais de barras de aço, espera-se um aumento gradativo da aplicação do CRF na construção civil brasileira. A normalização visa agrupar o conhecimento científico e tecnológico do país sobre o tema, conferindo confiabilidade aos projetistas ao especificar produtos que seguem padrões estabelecidos.

O controle de qualidade do CRF para uso como material estrutural é essencial e merece atenção conforme as recomendações normativas citadas. Além disso, a avaliação do comportamento do material em uso, como a estimativa da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, é fundamental para a disseminação do CRF nas edificações. Em inspeções estruturais, pode ser necessário extrair testemunhos de CRF para investigação das suas propriedades mecânicas, assim como ocorre com estruturas de concreto convencional.

Nesse contexto, a aplicação de Ensaios Não Destrutivos (END) em CRF é relevante. Diversas pesquisas analisaram as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço (Abbass; Khan; Mourad, 2018; Abrishambaf; Cunha; Barros, 2015; Chen, 1995; Conforti *et al.*, 2018; Leite; Castro, 2020; Shi *et al.*, 2020); contudo, são escassas as pesquisas no Brasil sobre ENDs aplicados ao CRF, especialmente no que se refere ao estabelecimento de correlações entre as propriedades mecânicas desse material e os parâmetros provenientes dos ENDs.

De acordo com Neville (2016), é de significativa importância estabelecer uma correlação entre a propriedade medida por um método não destrutivo e a resistência de corpos de prova de concreto, possibilitando relacionar um resultado de END a um valor de resistência. O guia do ACI 228.1R-19 (ACI, 2019) cita que a aplicação de mais de um END em um mesmo concreto aumenta a confiabilidade da resistência estimada, processo denominado de correlação combinada. No caso de concreto com fibras, há poucas pesquisas que abordam as correlações das propriedades mecânicas com ENDs.

A pesquisa desenvolvida aplicou métodos de ENDs em Concretos Reforçados com Fibras de Aço (CRFA), como esclerometria, ultrassonometria e ressonância acústica. Foram utilizados três distintos teores de fibras de aço (0,35%; 0,70% e 1,05%) em um mesmo traço de concreto classe C30. O objetivo foi investigar o comportamento dos resultados dos ENDs aplicados ao CRFA visando estabelecer curvas de correlação (simples e combinada) com as propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

A esclerometria, baseada na norma NBR 7584 (ABNT, 2012), e a ultrassonometria, baseada na norma NBR 8802 (ABNT, 2019), são os métodos não destrutivos mais difundidos e utilizados em concreto segundo Breysse (2012) e Camargo e Ferrari (2021). O método das frequências naturais de vibração, um END utilizado para

a estimativa do módulo de elasticidade do concreto por meio da técnica de excitação das frequências naturais de vibração por impulso, é regulamentado pela NBR 8522-2 (ABNT, 2021b).

Nas seções seguintes, são apresentadas as características dos materiais utilizados e a descrição da metodologia empregada na pesquisa (seção 2), os resultados obtidos com os ensaios não destrutivos e destrutivos (seção 3) e, finalmente, as principais conclusões do trabalho (seção 4).

## 2 Materiais e métodos

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, os grupos de concreto analisados e o programa experimental desenvolvido.

### 2.1 Materiais e grupos analisados

Foram analisados grupos de concreto com o mesmo traço. O grupo de referência, sem fibras, denominado CREF, apresentou resistência correspondente à classe C30. Os demais grupos, com CRFA, continham taxas de 0,35%, 0,70% e 1,05% de fibras de aço (valor do intervalo constante entre os teores e igual a 0,35%), denominados como CRF1, CRF2 e CRF3, respectivamente. O teor de 1,05% foi empregado por ser próximo ao valor de 1%, comumente empregado em pesquisas com fibras de aço (Leite; Castro, 2020; Shi *et al.*, 2020; Suk, 2022). Os outros dois teores foram definidos para efeito comparativo, com um grupo de baixo teor (0,35%) e outro intermediário (0,70%).

O agregado miúdo utilizado foi areia fina proveniente da região da cidade de Maringá, estado do Paraná-PR, cuja composição granulométrica foi determinada conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022). O módulo de finura foi igual a 1,52 e a dimensão máxima característica foi de 1,18 mm, com massa específica de 2,64 g/cm<sup>3</sup> conforme caracterização de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021c).

O agregado graúdo utilizado foi brita com dimensão máxima característica de 9,50 mm, a qual teve sua composição granulométrica determinada conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022), apresentando módulo de finura igual a 5,81 e dimensão máxima característica de 9,50 mm. A massa específica é de 2,77 g/cm<sup>3</sup>, conforme ensaio de acordo com a NBR 16917 (ABNT, 2021d). Maiores detalhes sobre a caracterização dos agregados podem ser consultados em Silva (2022).

O cimento Portland utilizado foi o CP II-Z-32 do fabricante Votoran, com massa específica aparente de 1,2 g/cm<sup>3</sup> conforme especificação do fabricante e massa específica absoluta de 3,0 g/cm<sup>3</sup>, determinada segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017). A fibra de aço utilizada foi do tipo arame trefilado a frio com gancho nas extremidades, denominada Wirand® FS3N, com comprimento de 33 mm, diâmetro de 0,75 mm e fator de forma igual a 44. A resistência à tração é superior a 1.100 MPa e o módulo de elasticidade é de 210 GPa, conforme indicações do fabricante. Trata-se de uma fibra de aço comum no mercado brasileiro, utilizada pela compatibilidade dimensional com o agregado graúdo (comprimento da fibra superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado).

O aditivo superplastificante ADVA 548 da GCP Applied Technologies, que tem massa específica de 1,10 g/cm<sup>3</sup>, foi utilizado para garantir a mobilidade dos materiais da mistura (trabalhabilidade) com a adição das fibras de aço.

O traço em massa utilizado na produção dos concretos foi o mesmo para todos os grupos e correspondente à proporção de 1:1,44:2,10:0,5 (cimento:areia:brita:água). O consumo de cimento foi de 468 kg/m<sup>3</sup>, agregado miúdo de 674 kg/m<sup>3</sup>, agregado graúdo de 982 kg/m<sup>3</sup> e 234 kg/m<sup>3</sup> de água. Os concretos foram produzidos utilizando-se uma betoneira elétrica com capacidade de 400 litros. As fibras de aço foram inseridas manualmente, distribuídas aleatoriamente com a betoneira em funcionamento. A ordem de adição dos materiais na betoneira foi: agregado graúdo, agregado miúdo, cimento, água, fibras e, por último, o aditivo (não utilizado no grupo CREF). O tempo de mistura foi de 1 a 2 minutos para cada adição de material na betoneira.

A dosagem de aditivo utilizada nos grupos CRF1, CRF2 e CRF3 foi de 0,05%, 0,1% e 0,15%, respectivamente. Esses valores foram necessários para obter o valor do *Slump Test* (NBR 16889 – ABNT, 2020) conforme indicado na Tabela 1. A metodologia adotada para a dosagem e produção dos concretos com fibras seguiu os procedimentos de Leite e Castro (2020), Avelar e Ferrari (2022) e Suk (2022). Os resultados da massa específica dos concretos no estado fresco foram obtidos conforme a norma NBR 9833 (ABNT, 2009) e estão também indicados na Tabela 1.

**Tabela 1** ▶

Valores do abatimento e massa específica dos grupos de concreto.  
Fonte: dados da pesquisa

Grupos	Abatimento (mm)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
CREF	100	2.362,91
CRF1	106	2.389,40
CRF2	95	2.389,40
CRF3	90	2.409,27

Foram moldados corpos de prova (CPs) cilíndricos com dimensões de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, visando evitar vibrações indesejáveis durante o ensaio de esclerometria, possibilitar a aplicação dos golpes em superfície mais plana possível e atender à distância mínima para a propagação da onda ultrassônica. Após a moldagem, os CPs permaneceram por 24 horas em local protegido de intempéries e, em seguida, foram armazenados em câmara úmida, sendo retirados 48 horas antes da execução de cada ensaio. A Figura 1 ilustra o aspecto das fibras de aço utilizadas na pesquisa e o concreto do grupo CREF durante o ensaio de abatimento do tronco de cone.

**Figura 1** ▶

Aspecto das fibras (a) e do concreto do grupo CREF (b) durante o ensaio de *slump test*.  
Fonte: arquivo dos autores



## 2.2 Programa experimental

A pesquisa foi caracterizada por um programa experimental envolvendo ensaios não destrutivos e destrutivos para a caracterização mecânica dos concretos de cada grupo. Os ensaios foram realizados aos 7, 28 e 56 dias, com o objetivo geral de estabelecer a correlação entre a resposta dos ENDS e a obtida por meio dos ensaios destrutivos de caracterização mecânica. Na Tabela 2 são indicados os ensaios que foram realizados, os respectivos referenciais normativos e o número de exemplares de CPs por grupo em cada idade.

**Tabela 2 ▼**

Programa experimental desenvolvido.

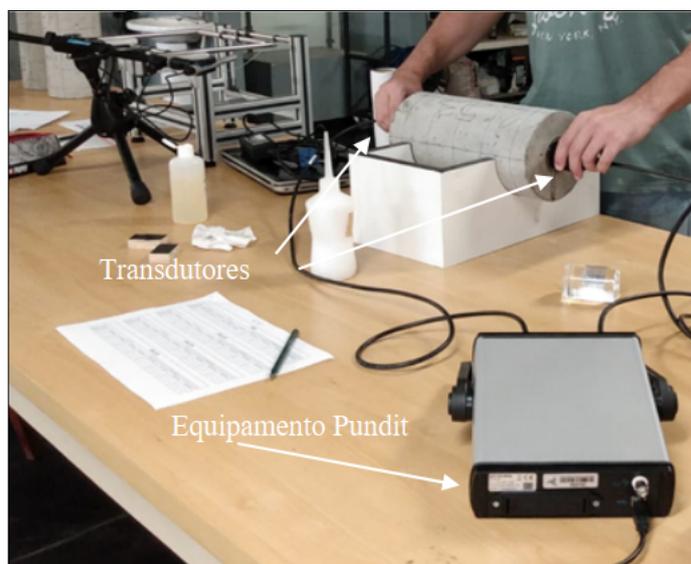
Fonte: dados da pesquisa

Ensaio	Tipo	Idade (dias)	Referência	Quantidade de CPs do grupo em cada idade
Destrutivo	Compressão axial ( $f_c$ )	7, 28 e 56	NBR 5739 (ABNT, 2018)	4
	Módulo de elasticidade estático ( $E_c$ )	7, 28 e 56	NBR 8522-1 (ABNT, 2021a)	4
	Módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ )	7, 28 e 56	NBR 8522-2 (ABNT, 2021b)	4
Não destrutivo	Velocidade de propagação da onda ultrassônica (VPU)	7, 28 e 56	NBR 8802 (ABNT, 2019)	4
	Dureza superficial pelo esclerômetro (IE)	7, 28 e 56	NBR 7584 (ABNT, 2012)	4

O ensaio de VPU foi realizado conforme as recomendações da NBR 8802 (ABNT, 2019), utilizando-se um equipamento tipo Pundit, fabricado pela empresa Proceq. A Figura 2 ilustra o ensaio de VPU, via modo de transmissão direta, aplicado em CP cilíndrico para correlação com a resistência à compressão ( $f_c$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_c$ ) do concreto. Durante a realização desse ensaio, uma atenção especial foi dada ao acoplamento e à pressão entre as superfícies dos transdutores e do concreto, sendo os valores considerados satisfatórios na ausência de variação entre as leituras.

**Figura 2 ►**

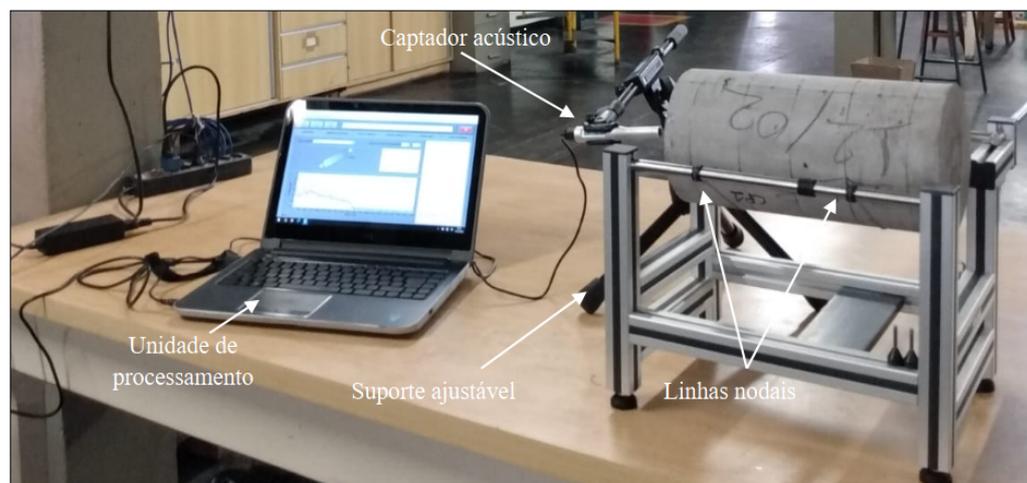
Ensaio de ultrassonometria (VPU).  
Fonte: arquivo dos autores



O ensaio para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) pelo método das frequências naturais de vibração foi realizado seguindo as recomendações da NBR 8522-2 (ABNT, 2021b) e utilizando-se o equipamento denominado Sonelastic (Figura 3), fabricado pela empresa ATCP Engenharia Física. Os resultados desse ensaio foram correlacionados com os resultados do módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) do concreto para fins da obtenção de uma equação analítica visando à estimativa do  $E_c$  a partir do resultado do  $E_d$  dos concretos dos grupos.

**Figura 3** ▶

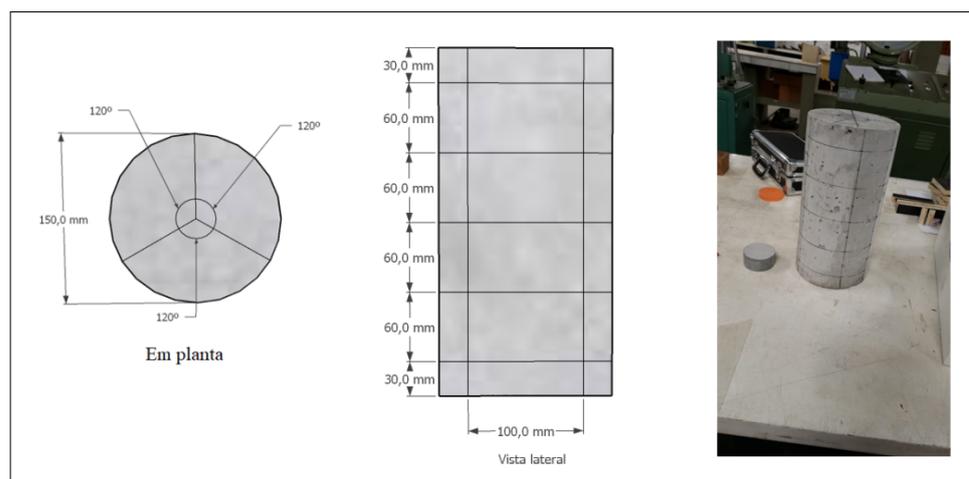
Ensaio de ressonância acústica pelo método das frequências naturais de vibração.  
Fonte: arquivo dos autores



O ensaio de esclerometria (IE) foi realizado conforme as recomendações da NBR 7584 (ABNT, 2012), utilizando-se um esclerômetro analógico de impacto Schmidt tipo N da Forest, com energia de percussão de 2,25 N.m. O ensaio foi aplicado em CPs cilíndricos para o estabelecimento de correlações do IE com a  $f_c$  e o  $E_c$  dos concretos. Foram realizadas 12 leituras de impacto nos CPs cilíndricos, sendo 4 pontos em cada geratriz posicionada ao longo da altura do CP, com ângulo de 120° entre si, conforme ilustrado na Figura 4.

**Figura 4** ▶

Reticulado desenhado no CP para ensaio de esclerometria (IE).  
Fonte: dados da pesquisa

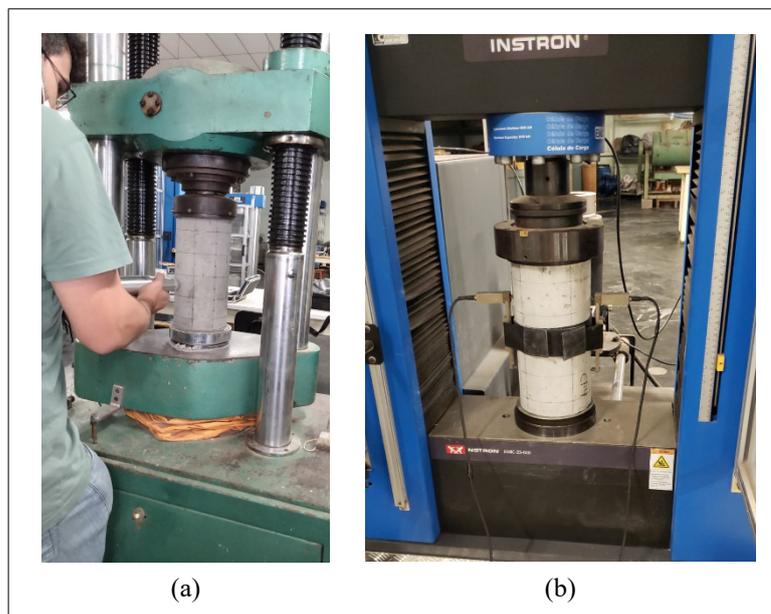


Para o ensaio de esclerometria, os impactos foram aplicados com o corpo de prova comprimido entre os pratos do equipamento por uma força igual a 15% daquela prevista para a ruptura (estimada com ensaios preliminares em CPs da mesma concretagem), conforme mostrado na Figura 5a. O ensaio para a determinação do módulo de elasticidade

estático ( $E_c$ ) foi realizado utilizando-se o equipamento Instron EMIC 23-600, com capacidade de 600 kN, como mostra a Figura 5b.

**Figura 5** ▶

Ensaio de esclerometria (a) e módulo de elasticidade estático (b).  
Fonte: arquivo dos autores



### 3 Resultados e discussões

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados obtidos. Inicialmente, são descritas as propriedades mecânicas dos concretos e, em seguida, apresentam-se os resultados dos ENDS e suas correlações.

**Tabela 3** ▼

Valores médios das propriedades mecânicas dos concretos.  
Fonte: dados da pesquisa

#### 3.1 Propriedades mecânicas dos concretos

A Tabela 3 apresenta os valores médios de resistência à compressão ( $f_{c,m}$ ) e módulo de elasticidade ( $E_{c,m}$ ), juntamente com os parâmetros estatísticos de desvio padrão ( $\sigma$ ) e coeficiente de variação (CV em %) para as idades de 7, 28 e 56 dias.

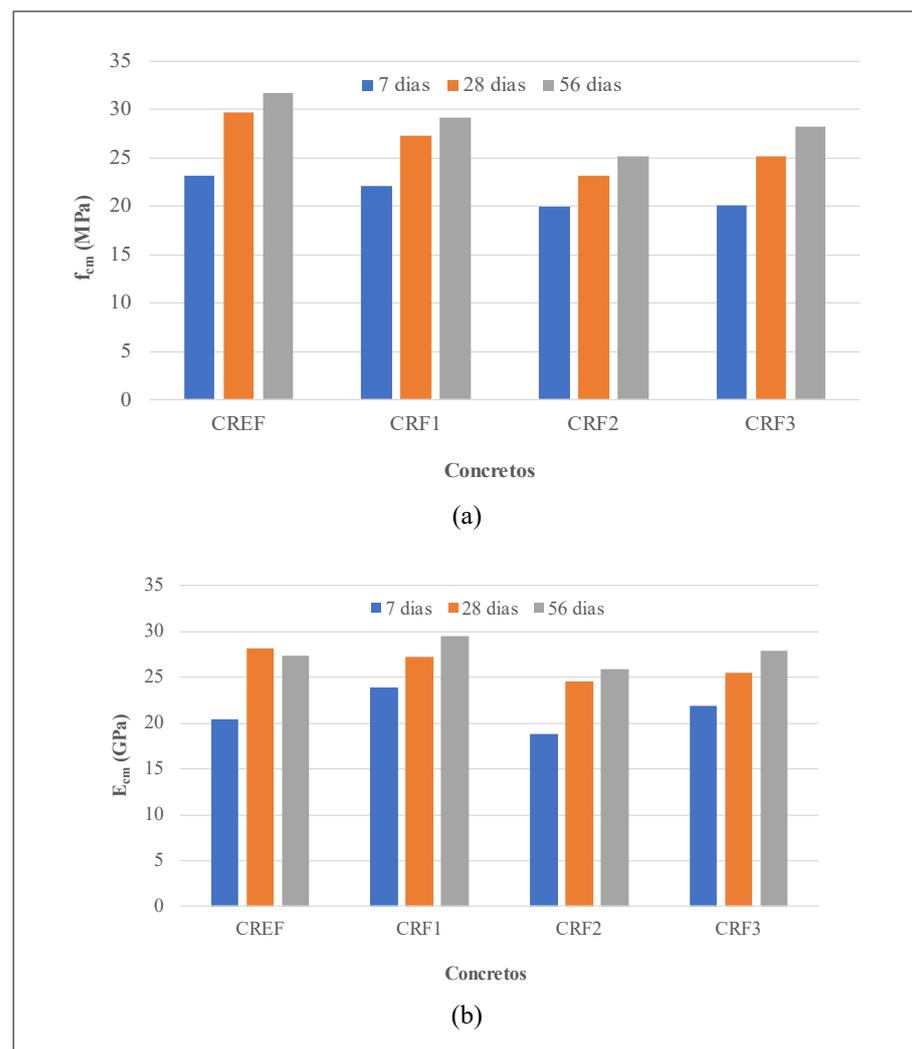
Grupos	Propriedades	7 dias	$\sigma$	CV	28 dias	$\sigma$	CV	56 dias	$\sigma$	CV
CREF	$f_{c,m}$ (MPa)	23,18	0,79	3,42	29,68	1,07	3,61	31,63	1,02	3,24
	$E_{c,m}$ (GPa)	20,39	1,05	5,13	28,18	3,46	3,46	27,27	0,93	3,33
CRF1	$f_{c,m}$ (MPa)	22,10	2,70	12,24	27,25	1,32	4,85	29,15	0,41	1,41
	$E_{c,m}$ (GPa)	23,90	1,68	7,04	27,19	1,48	5,45	29,42	1,35	4,58
CRF2	$f_{c,m}$ (MPa)	19,93	0,82	4,11	23,10	1,02	4,45	25,13	1,42	5,67
	$E_{c,m}$ (GPa)	18,80	0,65	3,44	24,60	0,77	3,13	25,89	1,86	7,20
CRF3	$f_{c,m}$ (MPa)	20,03	1,16	5,81	25,18	0,59	2,35	28,23	1,76	6,23
	$E_{c,m}$ (GPa)	21,86	0,24	1,10	25,46	0,52	2,05	27,87	1,63	5,84

A resistência à compressão do concreto convencional (CREF) aos 28 dias de idade foi aquele previamente planejado pela dosagem (29,68 MPa), sendo classificado como classe C30. Entre todos os concretos, o maior valor médio de resistência à compressão foi de 31,63 MPa, referente ao concreto CREF aos 56 dias, enquanto o menor valor foi de 19,93 MPa para o CRF2 aos 7 dias.

A adição de fibras reduziu a resistência à compressão dos concretos. As reduções nas idades de 7, 28 e 56 dias foram, respectivamente, de 4,66%, 14,02% e 13,59% para o grupo CRF1; 8,19%, 22,17% e 15,16% para o grupo CRF2; e 7,84%, 20,55% e 10,75% para o grupo CRF3 (Figura 6a). O maior coeficiente de variação foi de 12,24% para o concreto CRF1 aos 7 dias, sendo o único resultado de CV acima de 10%, o que indica boa representatividade dos valores de  $f_c$ .

**Figura 6** ▶

Evolução dos valores dos concretos.  
 (a) Resistência à compressão ( $f_{c,m}$ ).  
 (b) Módulo de elasticidade ( $E_{c,m}$ ).  
 Fonte: dados da pesquisa



A redução na resistência à compressão do concreto devido à presença das fibras de aço também foi verificada em outras pesquisas. Bauer *et al.* (2020) relataram que nenhuma das misturas com a presença de fibras apresentou valor superior ao traço de referência, indicando que a adição dessas fibras não contribuiu para o aumento da resistência à compressão. Pesquisas semelhantes incluem Prathap, Kumar e Narayana (2017), Abbas, Khan e Mourad (2018) e Avelar e Ferrari (2022).

Todos os concretos apresentaram aumento gradual na resistência à compressão com a evolução das idades. No concreto convencional, o aumento percentual na resistência

entre as idades de 7-28 dias e 7-56 dias foi de 28,04% e 36,45%, respectivamente. Nos concretos com fibras CRF1, CRF2 e CRF3, o aumento foi de 23,30% e 31,90%; 15,91% e 26,09%; e 25,71% e 40,94%, respectivamente.

O maior valor de módulo obtido foi de 29,42 GPa para o grupo CRF1 aos 56 dias, enquanto o menor valor foi de 18,80 GPa para o grupo CRF2 aos 7 dias. Em relação ao coeficiente de variação, o maior valor foi de 7,20% para o grupo CRF2 aos 56 dias, indicando boa representatividade dos resultados devido a todos os valores de CV estarem abaixo de 10%. Observa-se um aumento nos valores do módulo de elasticidade para os concretos CRF1, CRF2 e CRF3 com a evolução das idades, enquanto o CREF apresentou um aumento entre 7 e 28 dias, mantendo-se constante aos 56 dias de idade (Figura 6b).

### 3.2 Ensaio não destrutivos

**Tabela 4 ▼**

Valores médios do IE.

Fonte: dados da pesquisa

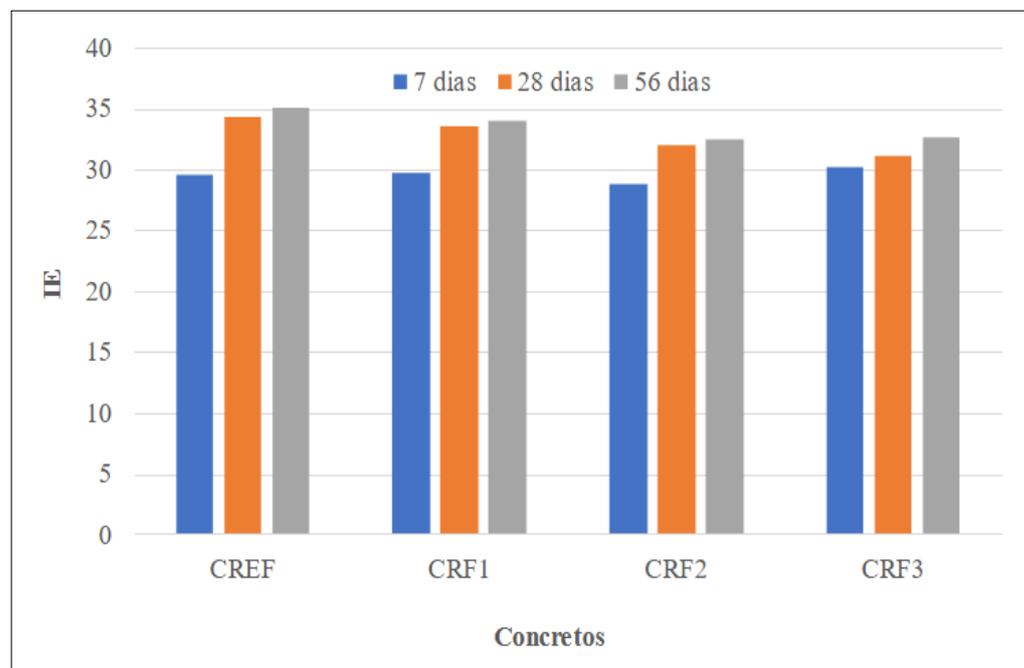
A Tabela 4 apresenta os valores médios do IE para os CPs cilíndricos, juntamente com o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação (CV em %). Na Figura 7, os valores obtidos são representados graficamente para melhor visualização.

Grupos	7 dias	$\sigma$	CV	28 dias	$\sigma$	CV	56 dias	$\sigma$	CV
CREF	29,64	0,51	1,73	34,31	0,43	1,26	35,05	0,97	2,75
CRF1	29,78	0,97	3,24	33,58	0,28	0,84	34,03	0,40	1,17
CRF2	28,87	0,15	0,53	32,02	0,22	0,68	32,44	0,74	2,29
CRF3	30,19	0,73	2,41	31,03	0,57	1,84	32,55	0,68	2,07

**Figura 7 ►**

Evolução dos valores do IE dos concretos.

Fonte: dados da pesquisa



O maior valor médio do IE foi de 35,05 para o concreto CREF aos 56 dias, enquanto o menor valor foi de 28,87 no concreto CRF2 aos 7 dias. O maior coeficiente de variação

foi de 3,24% para o concreto CRF1 aos 7 dias, indicando boa representatividade dos resultados, uma vez que os valores estão abaixo de 10%. Nota-se que os valores de IE para o concreto sem fibras são sempre maiores que os dos concretos com fibras, exceto aos 7 dias para os grupos CRF1 e CRF3.

A Tabela 5 apresenta os valores médios da VPU, juntamente com o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação (CV – em %) dos resultados. Na Figura 8, os resultados são indicados graficamente para melhor visualização da evolução com a idade e entre os concretos.

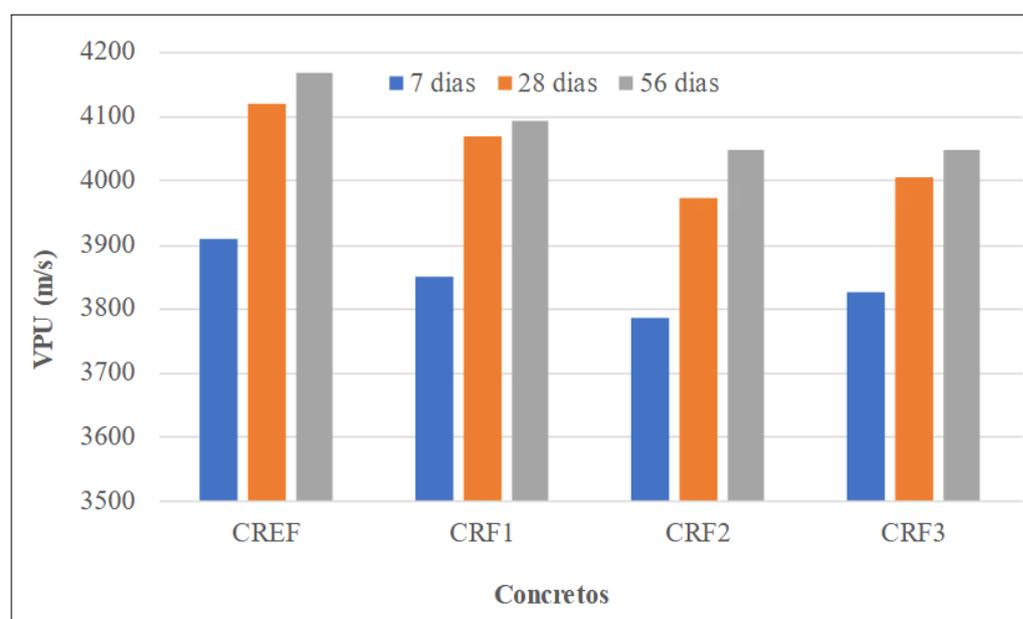
**Tabela 5** ▶

Resultados da VPU (m/s).  
Fonte: dados da pesquisa

Grupos	7 dias	$\sigma$	CV	28 dias	$\sigma$	CV	56 dias	$\sigma$	CV
CREF	3.907	45	1,15	4.120	18	0,45	4.168	18	0,42
CRF1	3.849	71	1,84	4.068	41	1,00	4.093	20	0,50
CRF2	3.785	10	0,26	3.972	17	0,44	4.046	11	0,27
CRF3	3.825	24	0,62	4.005	22	0,56	4.047	34	0,84

**Figura 8** ▶

Evolução dos valores da VPU dos concretos.  
Fonte: dados da pesquisa



O maior valor médio da VPU foi de 4.168 m/s no concreto CREF aos 56 dias, enquanto o menor valor foi de 3.785 m/s para o concreto CRF2 aos 7 dias. O maior coeficiente de variação foi de 1,84% para o concreto CRF1 aos 7 dias, indicando boa representatividade dos resultados, já que os valores estão abaixo de 10%. Verifica-se que os maiores valores de VPU foram registrados para o concreto sem fibras, aumentando com a idade. Para os concretos com fibras, o valor da VPU diminuiu do CRF1 para o CRF2, mas voltou a crescer para o CRF3 em relação ao CRF2, sempre inferior ao CRF1.

A análise mostra a sensibilidade da VPU à presença de fibras de aço na matriz de concreto, criando uma zona de transição que afeta a propagação da onda. Em teores elevados, o efeito da interface fibra-matriz parece ser compensado pela maior quantidade de fibras, aproximando os valores da VPU aos do concreto sem fibras.

A Tabela 6 mostra os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{d,m}$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação (CV em %) dos resultados. Na Figura 9, os resultados são representados de forma gráfica.

**Tabela 6** ▶

Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos (GPa).

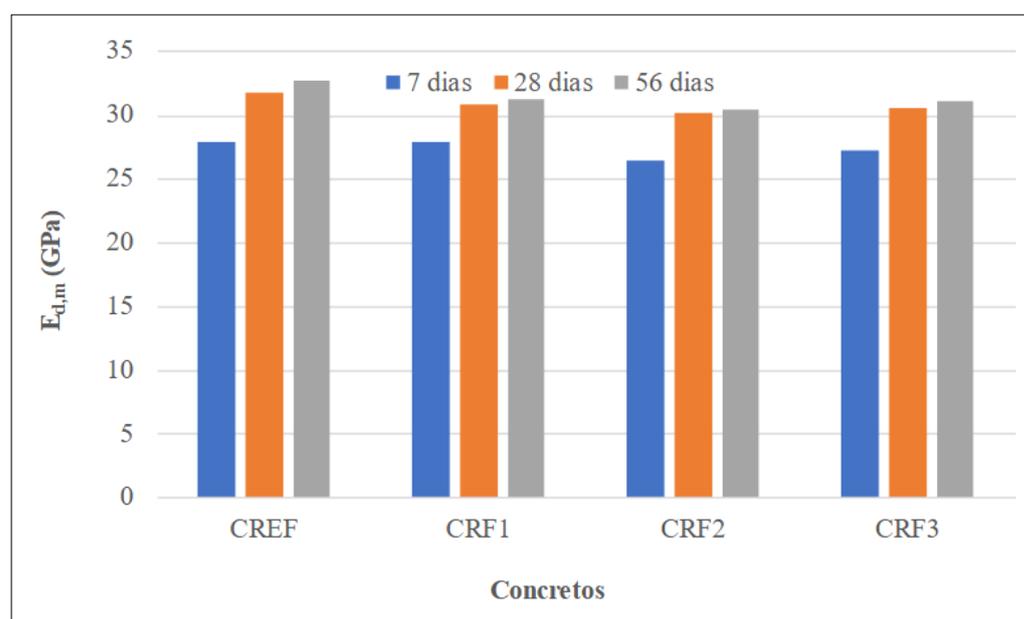
Fonte: dados da pesquisa

Grupos	7 dias			28 dias			56 dias		
	$E_{d,m,7}$	$\sigma$	CV	$E_{d,m,28}$	$\sigma$	CV	$E_{d,m,56}$	$\sigma$	CV
CREF	27,92	0,34	1,22	31,74	0,29	0,91	32,72	0,30	0,91
CRF1	27,84	1,26	4,53	30,78	0,51	1,65	31,23	0,31	1,00
CRF2	26,46	0,30	1,14	30,20	0,46	1,54	30,41	0,15	0,49
CRF3	27,23	0,40	1,46	30,56	0,15	0,49	31,06	0,67	2,14

**Figura 9** ▶

Evolução dos valores do  $E_d$  dos concretos.

Fonte: dados da pesquisa



O maior valor médio de módulo dinâmico obtido foi de 32,72 GPa para o grupo CREF aos 56 dias, enquanto o menor valor foi de 26,46 GPa para o grupo CRF2 aos 7 dias. Em relação ao coeficiente de variação, o maior valor foi de 4,53% para o grupo CRF1 aos 7 dias, indicando boa representatividade dos resultados devido à concentração dos valores com CV abaixo de 5%. Observa-se que os valores do módulo dinâmico para o concreto sem fibras são superiores aos dos concretos com fibras em todas as idades. A adição de fibras resultou em diminuição nos valores do módulo dinâmico.

### 3.3 Correlações para a estimativa da resistência à compressão ( $f_c$ )

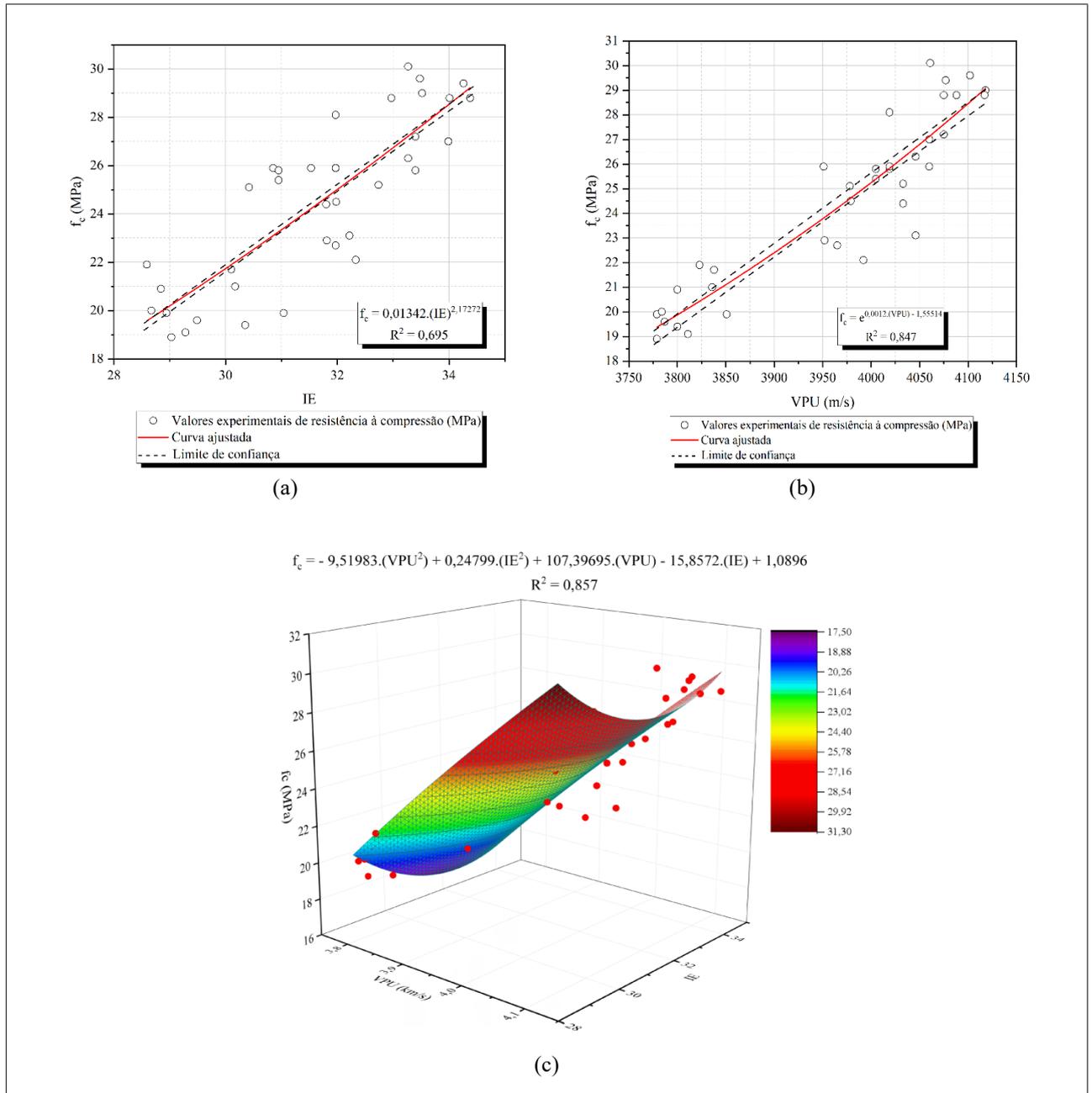
Na Figura 10 são apresentadas as curvas de correlação simples ( $IE \times f_c$ ) e ( $VPU \times f_c$ ), bem como a correlação combinada ( $IE \times VPU \times f_c$ ) para os grupos de CRFA. Cada curva é acompanhada pela equação representativa e pelo respectivo coeficiente de determinação  $R^2$ . A resistência  $f_c$  é medida em MPa e a VPU é medida em m/s para as correlações simples e em km/s para a correlação combinada. A seleção da curva que

**Figura 10** ▼

Curvas de correlação.  
 (a)  $IE \times f_c$ . (b)  $VPU \times f_c$ .  
 (c)  $VPU \times IE \times f_c$ .

Fonte: dados da pesquisa

melhor se ajusta aos dados experimentais baseou-se no coeficiente de determinação  $R^2$ , no desvio padrão residual ( $S_{res}$ ) e no parâmetro estatístico  $\alpha$ , definido como  $S_{res}$  dividido pelo valor médio de  $f_c$  ou  $E_c$ .



A correlação ( $IE \times f_c$ ) foi representada por uma equação do tipo potência (Equação 1) com  $R^2 = 0,695$ ,  $S_{res} = 1,92$  MPa e  $\alpha = 7,87\%$ . A correlação ( $VPU \times f_c$ ) foi descrita por uma equação do tipo exponencial (Equação 2) com  $R^2 = 0,847$ ,  $S_{res} = 1,43$  MPa e  $\alpha = 5,83\%$ . A correlação combinada foi representada por uma equação polinomial (Equação 3) com  $R^2 = 0,857$ ,  $S_{res} = 1,23$  MPa e  $\alpha = 5,14\%$ .

$$f_c = 0,01342(IE)^{2,17272} \tag{1}$$

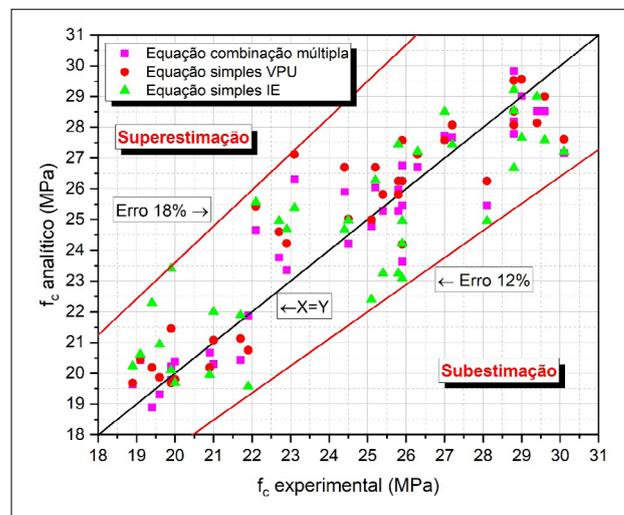
$$f_c = e^{0,0012(VPU)-1,55514} \quad (2)$$

$$f_c = -9,51983(VPU^2) + 0,24799(IE^2) + 107,39695(VPU) - 15,8572(IE) + 1,0896 \quad (3)$$

Na Figura 11, a comparação entre os valores experimentais de resistência à compressão ( $f_c$  experimental) e os valores analíticos ( $f_c$  analítico) estimados pelas equações representativas das correlações mostra que os resultados representados se encontram próximos da linha de igualdade ( $X = Y$ ), indicando elevada assertividade das equações para estimar a resistência à compressão dos concretos. Os erros associados com a superestimativa e a subestimativa dos resultados limitam-se, respectivamente, a 18% e a 12%.

**Figura 11** ►

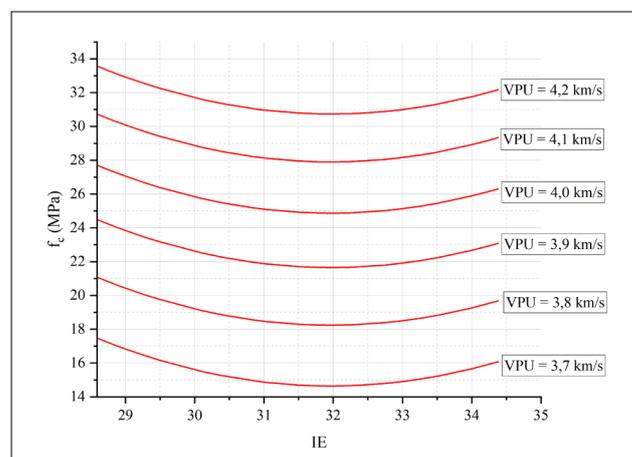
Estimativa da resistência  $f_c$  pelas correlações.  
Fonte: dados da pesquisa



Os resultados da correlação simples com IE apresentaram os maiores erros percentuais, enquanto a correlação com VPU mostrou erros percentuais abaixo de 10%, com apenas dois pontos acima desse valor. A correlação combinada não resultou em melhoria significativa na assertividade em relação à correlação simples com VPU (1,20% de diferença). No entanto, o uso combinado de ENDS é recomendado por possibilitar resultados mais confiáveis, pois um END pode referenciar o outro. A Figura 12 apresenta um ábaco para estimativa da resistência  $f_c$  a partir da combinação dos valores de IE e VPU.

**Figura 12** ►

Ábaco proposto para estimativa da  $f_c$  por meio da correlação combinada.  
Fonte: dados da pesquisa

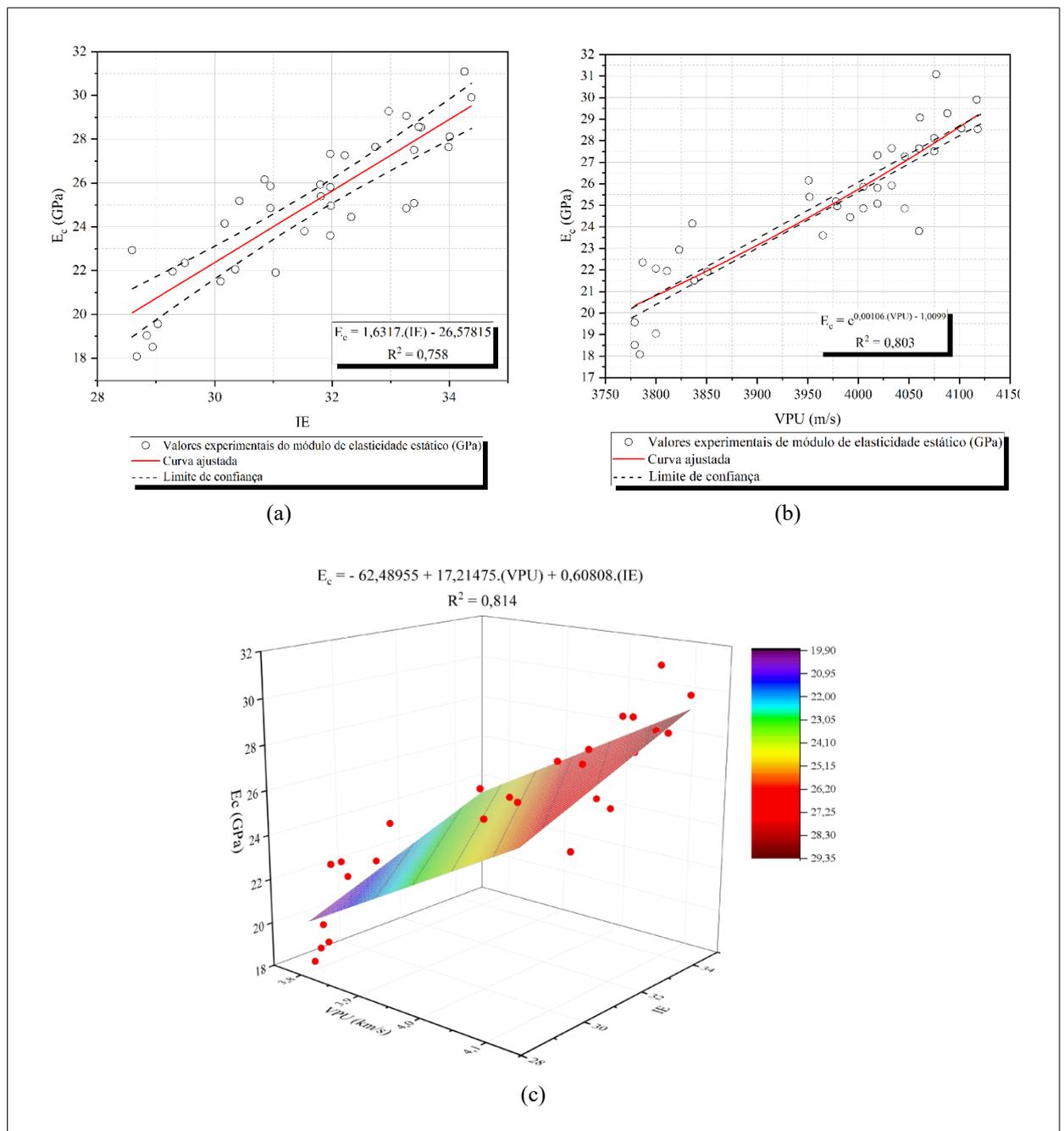


### 3.4 Correlações para a estimativa do módulo de elasticidade ( $E_c$ )

**Figura 13** ▼

Curvas de correlação.  
 (a)  $IE \times E_c$ . (b)  $VPU \times E_c$ .  
 (c)  $VPU \times IE \times E_c$ .  
 Fonte: dados da pesquisa

Na Figura 13 são indicadas as curvas de correlação simples ( $IE \times E_c$ ) e ( $VPU \times E_c$ ), bem como a correlação combinada ( $IE \times VPU \times E_c$ ) para os grupos CRFA. Cada curva é acompanhada pela equação representativa e pelo respectivo coeficiente de determinação  $R^2$ . O módulo de elasticidade ( $E_c$ ) é medido em GPa, com a VPU em m/s para as correlações simples e em km/s para a correlação múltipla.



A correlação ( $IE \times E_c$ ) foi representada por uma equação linear (Equação 4) com  $R^2 = 0,758$ ,  $S_{res} = 1,61$  GPa e  $\alpha = 6,45\%$ . A correlação ( $VPU \times E_c$ ) foi descrita por uma equação exponencial (Equação 5) com  $R^2 = 0,803$ ,  $S_{res} = 1,53$  GPa

e  $\alpha = 6,12\%$ . A correlação combinada foi representada por uma equação linear (Equação 6) com  $R^2 = 0,814$ ,  $S_{res} = 1,39$  GPa e  $\alpha = 5,57\%$ .

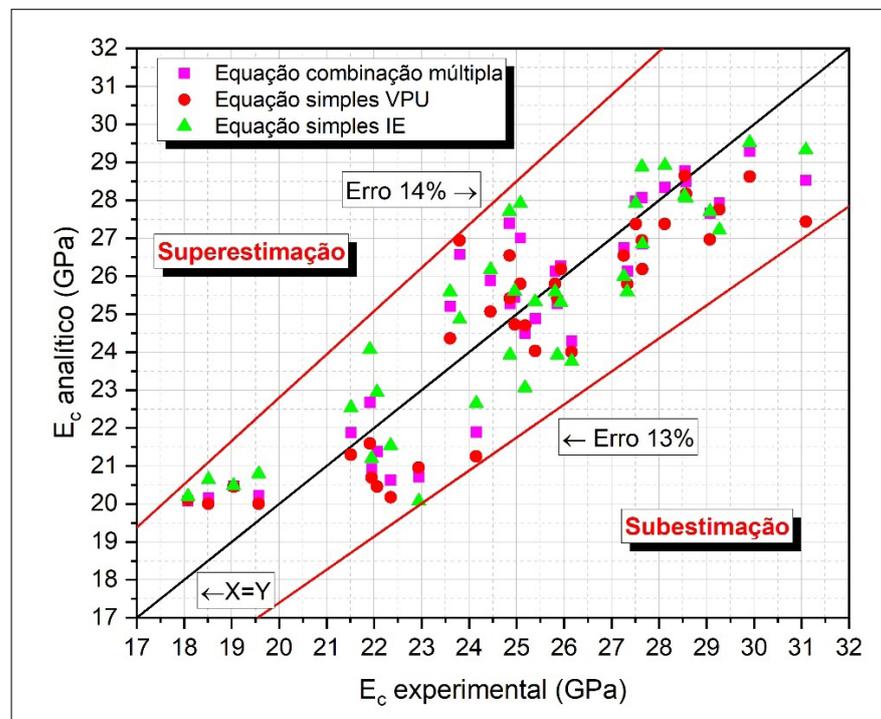
$$E_c = 1,6317(IE) - 26,57815 \quad (4)$$

$$E_c = e^{0,00106(VPU)-1,0099} \quad (5)$$

$$E_c = -62,48955 + 17,21475(VPU) + 0,60808(IE) \quad (6)$$

Na Figura 14, a comparação entre os valores experimentais do módulo estático ( $E_c$  experimental) e os valores analíticos ( $E_c$  analítico) estimados pelas equações representativas das correlações mostra que os resultados se encontram próximos da linha de igualdade ( $X = Y$ ), indicando alta assertividade das equações para estimar o módulo de elasticidade do CRFA. Os erros de superestimativa e subestimativa dos resultados limitam-se, respectivamente, a 14% e 13%.

**Figura 14** ►  
Estimativa do  $E_c$   
pelas correlações.  
Fonte: dados da pesquisa

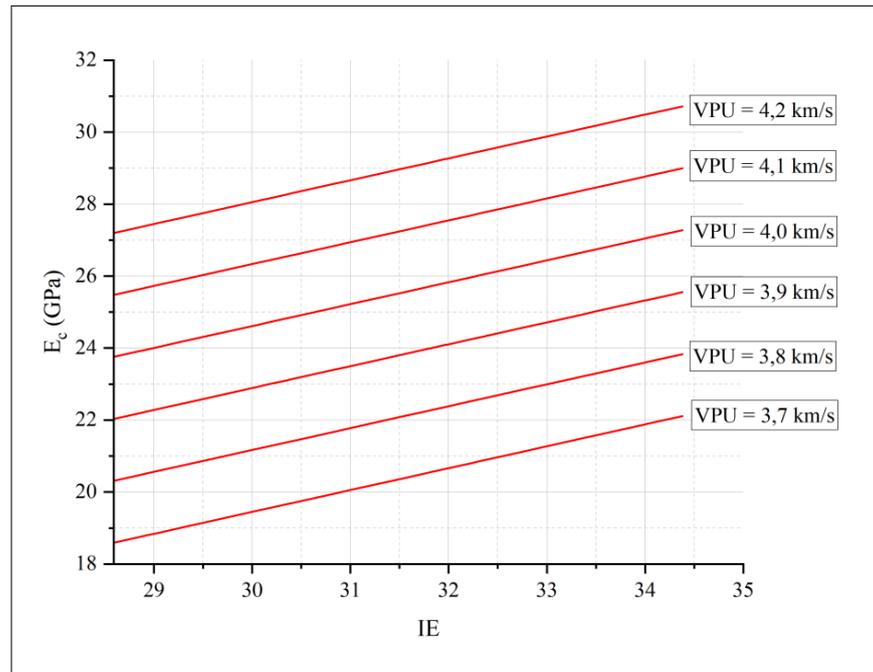


Os resultados mostram que não houve discrepância significativa entre as três equações, com erros percentuais semelhantes: 13,20% para a VPU, 12,50% para o IE e 11,66% para a correlação combinada. A correlação combinada dos resultados (IE e VPU) pouco melhorou (1,37%) a assertividade na estimativa do módulo de elasticidade ( $E_c$ ). A Figura 15 apresenta um ábaco para a estimativa do  $E_c$  a partir da correlação combinada.

**Figura 15** ►

Ábaco proposto para a estimativa do  $E_c$  através da correlação combinada.

Fonte: dados da pesquisa



### 3.5 Correlação do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) com o módulo estático ( $E_c$ )

A Tabela 7 apresenta a relação  $E_d/E_c$  para cada tipo de concreto com a idade. A menor relação obtida foi no grupo CRF1 aos 56 dias, com um valor de 1,06, enquanto a maior relação obtida foi no grupo CRF2 aos 7 dias, com um valor de 1,40. Esses resultados indicam que os valores do módulo dinâmico ( $E_d$ ) são superiores aos do módulo estático ( $E_c$ ). Para o concreto sem fibras, a diferença entre os valores foi maior nos primeiros dias, tendência essa também observada nos concretos contendo fibras, nos quais os valores do módulo dinâmico tendem a se aproximar dos do módulo estático com o passar do tempo.

**Tabela 7** ►

Relação entre os módulos de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) e estático ( $E_c$ ).

Fonte: dados da pesquisa

Grupos	$E_{d,7}/E_{c,7}$	$E_{d,28}/E_{c,28}$	$E_{d,56}/E_{c,56}$
CREF	1,37	1,13	1,17
CRF1	1,17	1,13	1,06
CRF2	1,41	1,23	1,18
CRF3	1,25	1,20	1,12

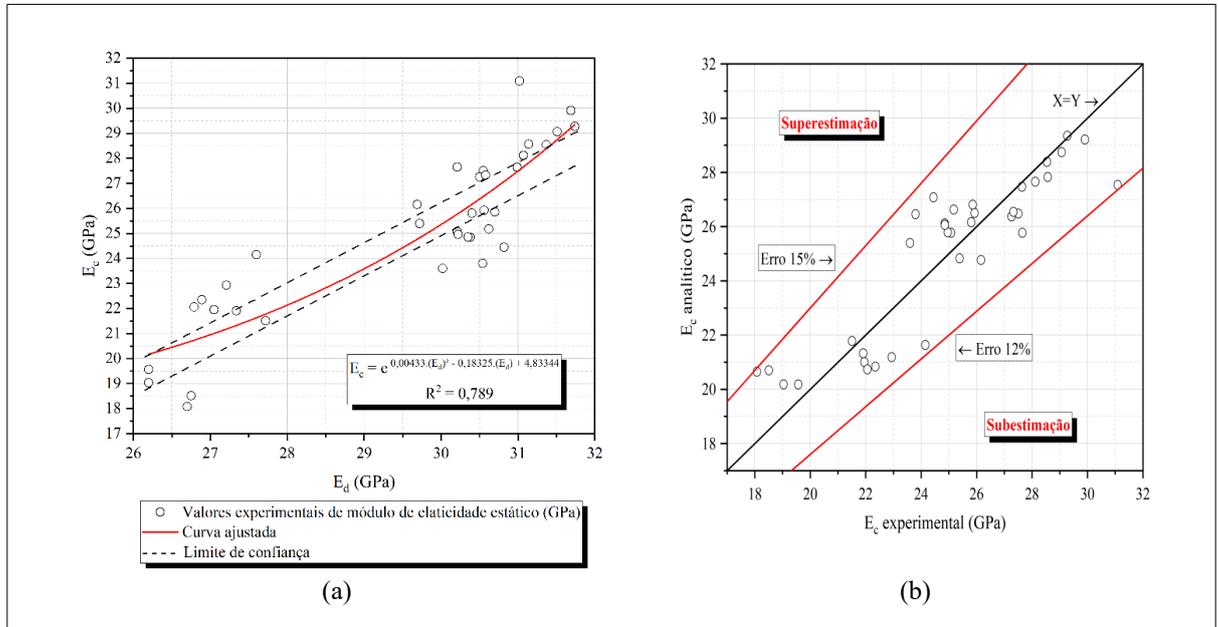
O estudo de correlação entre os módulos de elasticidade ( $E_d \times E_c$ ), considerando somente os grupos de CFRA, é indicado na Figura 12. A curva foi melhor representada por uma equação exponencial (Equação 7) com  $R^2 = 0,789$ ,  $S_{res} = 1,48$  GPa e parâmetro  $\alpha = 5,94\%$ . Na Figura 16, é indicada a comparação entre os valores experimentais de módulo de elasticidade estático ( $E_c$  experimental) com os valores analíticos ( $E_c$  analítico) estimados pela equação representativa da correlação dos

**Figura 16** ▼  
(a) Curva de correlação  $E_d \times E_c$ .  
(b) Comparação do  $E_c$  experimental com o analítico.

Fonte: dados da pesquisa

concretos contendo fibras. A faixa de erro variou entre 15% para superestimativa e 12% para subestimativa.

$$E_c = e^{0,00433 (E_d)^2 - 0,18325 (E_d) + 4,83344} \quad (7)$$



Com base nos resultados obtidos para os concretos analisados, a recomendação para estimativa do módulo de elasticidade estático a partir do módulo dinâmico é:

- Para concretos sem fibras até 32 MPa:  $E_c = 0,83 \cdot E_d$  com  $R^2 = 0,661$ ;
- Para concretos contendo fibras de aço até 32 MPa:  $E_c = 0,85 \cdot E_d$  com  $R^2 = 0,615$ ;
- Para concreto contendo fibras até 32 MPa, considerando a variável taxa de fibras (% fibras):  $E_c = 1,58555 \cdot E_d - 1,76896 \cdot (\% \text{ fibras}) - 20,58231$  com  $R^2 = 0,804$ .

## 4 Conclusões

A pesquisa utilizou métodos não destrutivos, como a velocidade de propagação de pulso ultrassônico, o ensaio de dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão e o método das frequências naturais de vibração, para estimar as propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade estático) por meio de correlações simples e combinadas com os resultados dos ensaios destrutivos. Os ensaios foram realizados em três grupos de concretos com diferentes taxas de fibras (0,35%, 0,70% e 1,05%) nas idades de 7, 28 e 56 dias. A partir dos resultados obtidos, as seguintes conclusões foram extraídas:

- Todos os concretos apresentaram aumento gradativo na resistência à compressão e no módulo de elasticidade com a idade;
- A adição de fibras de aço resultou em uma redução na resistência à compressão dos concretos. Em comparação ao concreto sem fibras aos 28 dias, as reduções

foram de 14,02%, 22,17% e 20,55% para as taxas de 0,35%, 0,70% e 1,05%, respectivamente;

- Aos 28 dias, os valores do módulo de elasticidade estático dos concretos com fibras foram inferiores aos do concreto sem fibras;
- Os valores do IE para o concreto sem fibras foram sempre maiores do que os valores dos concretos com fibras, exceto aos 7 dias, quando os grupos CRF1 e CRF3 apresentaram valores ligeiramente superiores ao CREF;
- Aos 7 dias de idade, os valores de IE para os concretos com fibras foram praticamente iguais; Aos 28 e 56 dias, os valores do IE para o concreto CREF foram maiores do que os valores dos concretos com fibras, com uma tendência de diminuição do IE com o aumento do teor de fibras;
- Os valores da VPU para o concreto CREF foram superiores aos dos concretos com fibras, independentemente da idade analisada. Houve uma tendência de diminuição dos valores da VPU do CREF para os concretos CREF1 e CREF2, mas essa tendência não foi observada para o CREF3;
- O comportamento da resposta do  $E_d$  foi similar ao observado para a VPU, com uma tendência de diminuição dos valores obtidos para o CREF em relação aos concretos CRF1 e CRF2, independentemente da idade. Para o CREF3, os valores do  $E_d$  foram da mesma ordem de grandeza dos obtidos para o CREF2;
- A melhor correlação entre o IE e a  $f_c$  dos concretos com fibras foi obtida por meio de uma equação do tipo potência, com  $R^2 = 0,695$ ,  $S_{res} = 1,92$  MPa e  $\alpha = 7,87\%$ . A faixa de erros para a estimativa da resistência variou entre 20% para superestimativa e 14% para subestimativa;
- A melhor correlação entre a VPU e a  $f_c$  dos concretos com fibras foi obtida por meio de uma equação exponencial, com  $R^2 = 0,847$ ,  $S_{res} = 1,43$  MPa e  $\alpha = 5,83\%$ ;
- A correlação combinada entre VPU, IE e  $f_c$  não resultou em aumento significativo no grau de determinação ( $R^2 = 0,857$ ) em comparação com a correlação simples  $VPU \times f_c$ , com  $S_{res} = 1,26$  MPa e  $\alpha = 5,14\%$ ;
- Foi obtida uma correlação razoável entre IE e  $E_c$  por meio de uma equação linear, com  $R^2 = 0,758$ ,  $S_{res} = 1,61$  GPa e  $\alpha = 6,45\%$ ;
- A melhor correlação entre a VPU e o  $E_c$  foi obtida por meio de uma equação exponencial, com  $R^2 = 0,803$ ,  $S_{res} = 1,53$  GPa e  $\alpha = 6,12\%$ ;
- A melhor correlação combinada entre VPU, IE e  $E_c$  não apresentou aumento significativo no valor do coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,814$ ) em comparação com a correlação simples (IE  $\times$   $E_c$ );
- Os valores do módulo dinâmico são superiores aos do módulo estático em todas as idades e para todas as taxas de fibras;
- A correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático para os concretos com fibras foi melhor representada por uma equação exponencial, com  $R^2 = 0,789$ ,  $S_{res} = 1,48$  GPa e  $\alpha = 5,94\%$ ;
- O módulo de elasticidade estático dos concretos com fibras foi estimado a partir do módulo dinâmico, com uma faixa de assertividade entre 15% para superestimativa e 12% para subestimativa.

Com base nos resultados obtidos, as seguintes direções são sugeridas para futuros trabalhos: estabelecimento de correlações dos END<sub>s</sub> com a resistência à tração na flexão do CRFA; estudo com outros teores e tipos de fibras de aço e resistência do concreto.

## Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

## Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

## Nota

Este artigo é derivado de dissertação do curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá (UEM) de Mikael Milam da Silva, disponível em: <https://pcv.uem.br/documentos/dissertacao-de-mestrado/01-item-homologacao-mikael-milam-dissertacao.pdf>.

## Contribuições ao artigo

**SILVA, M. M.:** concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados. **SANVEZZO, R. C.:** concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados. **FERRARI, V. J.:** revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

## Referências

ABBASS, W.; KHAN, M. I.; MOURAD, S. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 556-569, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164>.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7584:** Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-1:** Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-2**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo: Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021d.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16935**: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021e.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16938**: Concreto reforçado com fibras – Controle da qualidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2021f.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16939**: Concreto reforçado com fibras: Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021g.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16940**: Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021h.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABRISHAMBAF, A.; CUNHA, V. M. C. F.; BARROS, J. A. O. The influence of fibre orientation on the post-cracking tensile behaviour of steel fibre reinforced

self-compacting concrete. **Frattura ed Integrità Strutturale**, v. 9, n. 31, p. 38-53, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.31.04>.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.1R-19**: report on methods for estimating in-place concrete strength. Farmington Hills: ACI, 2019.

AVELAR, D. W. C.; FERRARI, V. J. Eficiência de fibras de aço no reforço ao cisalhamento de vigas chatas. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 25, n. 2, p. 108-124, 2022. Disponível em: <https://www.revistarebram.com/index.php/revistauniara/article/view/1468>. Acesso em: 26 set. 2023.

BAUER, A. L.; EHRENBRING, H.; SCHNEIDER, D.; QUININO, U. C. M.; TUTIKIAN, B. Evaluation of the impact of two types of steel fiber (SE), mono and 3D, on concrete properties, when added isolated or blended. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 13, n. 3, p. 464-482, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952020000300002>.

BREYSSE, D. (ed.). **Non-destructive assessment of concrete structures**: reliability and limits of single and combined techniques. Dordrecht: Springer, 2012. (RILEM State Art Reports, 1). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2736-6>.

CAMARGO, M. V.; FERRARI, V. J. Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 3, e13047, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13047>.

CHEN, L. Comparative toughness testing of fiber reinforced concrete. **ACI Special Publication**, v. 155, p. 41-76, 1995. DOI: <https://dx.doi.org/10.14359/928>.

CONFORTI, A.; MINELLI, F.; PLIZZARI, G. A.; TIBERTI, G. Comparing test methods for the mechanical characterization of fiber reinforced concrete. **Structural Concrete**, v. 19, n. 3, p. 656-669, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201700057>.

FERRARI, V. J.; HANAI, J. B. Desenvolvimento e análise de compósitos cimentícios híbridos de alto desempenho. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 2, n. 3, p. 254-270, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952009000300004>.

FERRARI, V. J.; HANAI, J. B. Influências de fibra de aço no comportamento estrutural de vigotas reforçadas com PRFC. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 1, p. 16-30, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952011000100002>.

LEITE, A. M.; CASTRO, A. L. Influence of the cementitious matrix on the behavior of fiber reinforced concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 3, p. 543-562, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000300006>.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PRATHAP, P.; KUMAR, T. N.; NARAYANA, S. M. V. Evaluation of mechanical properties of concrete using silica fume and steel fibers. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 8, n. 5, p. 332-338, 2017. Disponível em: <https://www.ijser.org/researchpaper/Evaluation-of-Mechanical-Properties-of-Concrete-using-Silica-fume-and-Steel-fibers.pdf>. Acesso em: 26 set. 2023.

SHI, X.; PARK, P.; REW, Y.; HUANG, K.; SIM, C. Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension. **Construction and Building Materials**, v. 233, 117316, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117316>.

SILVA, M. M. **Ensaio não destrutivo aplicado ao concreto reforçado com fibras (CRF):** evolução da velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU) e correlações. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2022. Disponível em: <http://www.pcv.uem.br/documentos/dissertacao-de-mestrado/01-item-homologacao-mikael-milam-dissertacao.pdf>. Acesso em: 26 set. 2023.

SUK, D. A. **Concreto reforçado com fibras de aço:** aplicação no comportamento ao cisalhamento de vigas. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2022. Disponível em: <http://www.pcv.uem.br/documentos/dissertacao-de-mestrado/02-homologacao-dissertacao-diego-suk.pdf>. Acesso em: 26 set. 2023.