

Ensaio não destrutivo aplicado ao concreto reforçado com fibras de aço: correlações com as propriedades mecânicas

Mikael Milam da Silva^[1], Rodolfo Coleone Sanvezzo^[2], Vladimir José Ferrari^[3]

^[1] mikamilam@hotmail.com, ^[2] eng.rodolfocoleone@gmail.com, ^[3] vladimirjf@hotmail.com.
Universidade Estadual de Maringá (UEM), Brasil

RESUMO

O concreto é um material muito empregado na construção civil brasileira, entretanto, seu comportamento sob a ação de esforços de tração não é satisfatório. Por outro lado, a introdução de fibras de aço no concreto possibilita melhoria das suas propriedades à tração, principalmente pelo efeito ponte das fibras. No Brasil, após a publicação em 2021 do conjunto de normas relacionadas ao concreto reforçado com fibras (CRF), espera-se um aumento gradativo da aplicação desse material na construção. Nesse sentido, o controle de qualidade do CRF para uso como material estrutural é de fundamental importância e a avaliação do desempenho desse material em utilização também é outro aspecto que está associado com sua disseminação. Diversas são as pesquisas que analisam as propriedades do CRF, entretanto, ainda são escassas investigações relacionadas com o estabelecimento de correlações das propriedades mecânicas do CRF com parâmetros provenientes dos Ensaio Não Destrutivo (END). A pesquisa foi desenvolvida buscando-se a aplicação de END, 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). Para tanto, foram estudados 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 os resultados dos END aplicados ao CRFA visando ao estabelecimento de curvas de correlação com as propriedades mecânicas do material, compressão axial (f_c) e módulo de elasticidade estático (E_c). O método da VPU foi o que conduziu à melhor estimativa da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos analisados. Os valores do módulo dinâmico foram superiores aos do módulo estático e, com o avanço da idade, a diferença entre os valores tende a diminuir. Os resultados obtidos demonstram, de maneira geral, boa assertividade das equações para estimativa da resistência à compressão dos concretos e do módulo de elasticidade.

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

Non-destructive tests applied on steel fiber reinforced concrete: correlations with the mechanical properties

Abstract

Concrete is widely used in Brazilian construction, however, when subjected to tensile stress its performance is not satisfactory. However, steel fiber reinforced concrete (SFRC) is a material that improves the tensile properties of concrete by the bridging effect of fibers. In Brazil, after the publication in 2021 of the set of standards related to FRC, a gradual increase in the application of this material in construction is expected. The quality control of FRC for use as a structural material is so important, however, another aspect that is associated with the dissemination of the use of FRC is the evaluation of its performance in service. There are several studies that analyze the properties of FRC, however, there are still few studies related to the establishment of correlations of FRC with parameters from non-destructive testing (NDT). The research was developed aiming at the application in CRFA of NDT, such as ultrasonic pulse velocity (UPV), rebound hammer of hardened concrete (RN) and dynamic Young's modulus by impulse excitation of vibration (E_d). Three different steel fiber contents (0.35%, 0.70% and 1.05%) were studied in the same mix of C30 concrete. The objective was to investigate the results of NDT applied to the SFRC aiming to establish correlation curves with its mechanical properties, axial compression (f_c) and the static modulus of elasticity (E_c). The UPV method was what led to the best estimate of the compressive strength and modulus of elasticity of the

analyzed concretes. The values of the dynamic module were higher than those of the static module and, with advancing age, the difference between values tends to decrease. The results demonstrate good assertiveness of the equations for estimating the compressive strength of concrete and the modulus of elasticity.

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

1 Introdução

O concreto é um material muito empregado na construção civil brasileira devido aos diversos fatores, entre eles, o baixo custo dos materiais e de produção, e o seu excelente desempenho quando solicitado à compressão. Entretanto, quando submetido aos esforços de tração, o seu desempenho não é satisfatório devido a sua baixa resistência, em geral, cerca de 1/10 da resistência à compressão.

A matriz cimentícia do concreto apresenta baixa resistência e pouca capacidade de deformação quando solicitada aos esforços de tração. Logo, em concreto armado, a resistência à tração do concreto é desprezada para fins de dimensionamento dos elementos estruturais e barras de aço são adicionadas em suas 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 aos esforços de tração. O CRF está inserido em um conceito de reforço do concreto pelo efeito ponte de tensões geradas pela presença das fibras que possibilita o controle da abertura e da propagação das fissuras. As fibras promovem uma alteração significativa do comportamento mecânico do concreto após a sua fissuração, aumentam 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 auxilia na 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 tema CRF, cita-se a NBR 16935 (ABNT, 2021c) e a NBR 16938 (ABNT, 2021d) relacionadas ao projeto de estruturas e ao controle de qualidade do CRF, respectivamente, bem como a NBR 16940 (ABNT, 2021f) e a NBR 16939 (ABNT, 2021e) referentes aos ensaios de caracterização do material por flexão e duplo punção, respectivamente.

Com a publicação das normas e o regramento quanto ao estabelecimento de requisitos de desempenho mecânico para estruturas de CRF, em atuação isolada ou em conjunto com as armaduras convencionais de barras de aço, a expectativa é o aumento gradativo da aplicação do CRF na construção civil brasileira. A normalização tem o caráter de agrupar a compreensão do conteúdo científico e tecnológico do país num determinado tema, dando a confiabilidade aos projetistas que especificam produtos que seguem ao padrão.

O controle de qualidade do CRF para uso como material estrutural é um aspecto fundamental e merece a devida atenção conforme é frisado pelas recomendações normativas anteriormente citadas. Entretanto, outro aspecto que está atrelado com a disseminação do uso do CRF nas edificações é a avaliação do comportamento do material quando em utilização (por exemplo, estimar sua resistência à compressão e o módulo de elasticidade). Em uma ocasião de uma inspeção estrutural pode incorrer em necessidade de proceder com a extração de testemunhos de CRF para investigação das suas propriedades mecânicas, assim, como ocorre nas estruturas em concreto convencional.

Então, nessa linha de raciocínio, a aplicação dos Ensaios Não Destrutivos (END) em CRF é relevante. Existem diversas pesquisas que analisam as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de aço (Abbass; Khan; Mourad, 2018; Abrishambaf; Cunha; Barros, 2015; Chen *et al.*, 1995; Conforti *et al.*, 2018; Leite; Castro, 2020; Shi *et al.*, 2020), contudo, são escassas, e quase inexistentes, pesquisas nacionais sobre END aplicados ao CRF, especialmente quando envolve o estabelecimento de correlações das propriedades mecânicas desse material com parâmetros provenientes dos END.

De acordo com Neville (2016), é de significativa importância estabelecer uma correlação com a propriedade medida, a partir de um método não destrutivo, com a resistência de corpos de prova de concreto, pois, com isso, é possível relacionar um resultado de END em 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 é realizada para aumentar o grau de confiabilidade da resistência estimada, sendo esse processo denominado por correlação combinada. Ao se tratar de concreto com fibras, há poucas pesquisas que abordam as correlações das propriedades mecânicas com END.

A pesquisa foi desenvolvida buscando-se a aplicação em Concretos Reforçados com Fibras de Aço (CRFA) dos métodos de END: 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 da pesquisa foi investigar o comportamento dos resultados dos ENDs (esclerometria, ultrassonometria e ressonância acústica) aplicados ao CRFA visando-se o estabelecimento de curvas de correlação (simples e combinada) com as propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

A esclerometria baseada na norma ABNT NBR 7584 (ABNT 2012) e a ultrassonometria, essa baseada na norma ABNT NBR 8802 (ABNT 2019) são os métodos não destrutivos mais difundidos e utilizados em concreto segundo Breyse (2012) e Camargo e Ferrari (2021). Já o método das frequências naturais de vibração é um END utilizado para a estimativa do módulo de elasticidade do concreto através da técnica de excitação das frequências naturais de vibração por impulso, sendo regulamentado pela ABNT NBR 8522-2 (ABNT, 2021).

Na sequência deste estudo, são apresentadas as características dos materiais utilizados e a descrição da metodologia empregada na pesquisa na seção 2. Em seguida, na seção 3 os resultados obtidos com os ensaios não-destrutivos e destrutivos são analisados e, por fim, são indicadas as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho na seção 4.

2 Materiais e métodos

Nesta seção apresentam-se os materiais que foram utilizados na pesquisa, os grupos de concreto analisados e o programa experimental que foi desenvolvido.

2.1 Materiais e grupos analisados

Foram analisados grupos de concreto de mesmo traço, sendo o grupo CREF (referência) sem fibras e resistência correspondente a classe C30 e, os demais grupos em CRFA com taxas de 0,35%, 0,70% e 1,05% (valor do intervalo constante entre os teores e igual a 0,35%), denominados por 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), conseqüentemente os outros dois teores foram definidos para efeito comparativo com um grupo de baixo teor (0,35%) e o outro intermediário (0,70%).

Como agregado miúdo foi utilizada areia fina proveniente da região da cidade de Maringá, estado do Paraná (PR) e a determinação da composição granulométrica foi realizada conforme ABNT NBR 17054 (ABNT, 2022), sendo o módulo de finura igual a 1,52 e a dimensão máxima característica igual a 1,18 mm. A massa específica é igual a 2,64 g/cm³ conforme caracterização de acordo com a ABNT NBR 16916 (ABNT, 2021).

Como agregado graúdo foi utilizada a brita de dimensão máxima característica de 9,50 mm, e a determinação da composição granulométrica foi realizada conforme a ABNT NBR 17054 (ABNT, 2022), sendo o módulo de finura igual a 5,81 e a dimensão máxima característica igual a 9,50 mm. A massa específica é de 2,77 g/cm³ conforme ensaio de acordo com a ABNT NBR 16917 (ABNT, 2021b). 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/cm³ conforme especificação do fabricante e massa específica absoluta de 3,0 g/cm³ conforme determinado segundo a ABNT NBR 16605 (ABNT, 2017).

A fibra de aço utilizada foi do tipo arame trefilado a frio com gancho nas extremidades, denominada por 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 disponibilizada no mercado brasileiro, comum em termos de comprimento e presença de ganchos e foi utilizada na pesquisa considerando a compatibilidade dimensional com o agregado graúdo (comprimento da fibra superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado).

O aditivo do tipo superplastificante (ADVA 548 da GCP Applied Technologies de massa específica de 1,10 g/cm³) foi utilizado para garantia da mobilidade dos materiais da mistura (trabalhabilidade) quando da adição das fibras de aço.

O traço em massa utilizado na produção dos concretos foi o mesmo para todos os grupos e correspondente a proporção de 1:1,44:2,10:0,5 (cimento:areia:brita:água). O consumo de cimento foi correspondente a 468 kg/m³, 674 kg/m³ de agregado miúdo, 982 kg/m³ de agregado graúdo e 234 kg/m³ de água.

Os concretos foram produzidos utilizando-se uma betoneira elétrica com capacidade de 400 litros e as fibras de aço foram inseridas manualmente, distribuídas aleatoriamente com a betoneira em funcionamento. A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi, inicialmente, pelo agregado graúdo, agregado miúdo, cimento, água, fibras e, por último, o aditivo (no grupo CREF não foi adicionado aditivo). O tempo de mistura foi entre 1 a 2 minutos para cada adição de material no interior da betoneira.

A dosagem de aditivo utilizada no CRF1, CRF2 e CRF3 foi de apenas 0,05%, 0,1% e 0,15%, respectivamente. Esses valores foram os necessários à obtenção do valor do *Slump Test* (ABNT NBR 16889, 2020) conforme indicado na Tabela 1. A metodologia aqui adotada para a dosagem e produção dos concretos com fibras foi a mesma utilizada por Leite e Castro (2020), Avelar e Ferrari (2002) e Suk (2022). Os resultados da massa específica dos concretos no estado fresco foram obtidos conforme ABNT NBR 9833 (ABNT, 2009) e estão também indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores do abatimento e massa específica dos grupos de concreto

Grupos	Abatimento (mm)	Massa específica (kg/m ³)
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 com o objetivo de evitar vibrações indesejáveis durante a realização do ensaio de Esclerometria, possibilitar a aplicação dos golpes em superfície mais plana possível e atendimento à distância mínima a ser percorrida pela onda ultrassônica. Após moldagem, os CPs permaneceram por 24 horas em local protegido de intempéries, em seguida foram armazenados em câmara úmida sendo retirados 48 horas antes da execução de cada ensaio. A Figura 1 reúne as ilustrações referentes ao 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*



(a)



(b)

Fonte: arquivo dos autores

2.2 Programa experimental

A pesquisa foi caracterizada por um programa experimental envolvendo ENDs e destrutivos para a caracterização mecânica dos concretos de cada grupo. Os ensaios foram realizados nas idades de 7, 28 e 56 dias, tendo como objetivo geral o estabelecimento da correlação da resposta do END com aquela obtida por meio do ensaio destrutivo de caracterização mecânica. Na Tabela 2 são indicados os ensaios que foram realizados, o respectivo referencial normativo e o número de exemplares de CPs por grupo em cada idade.

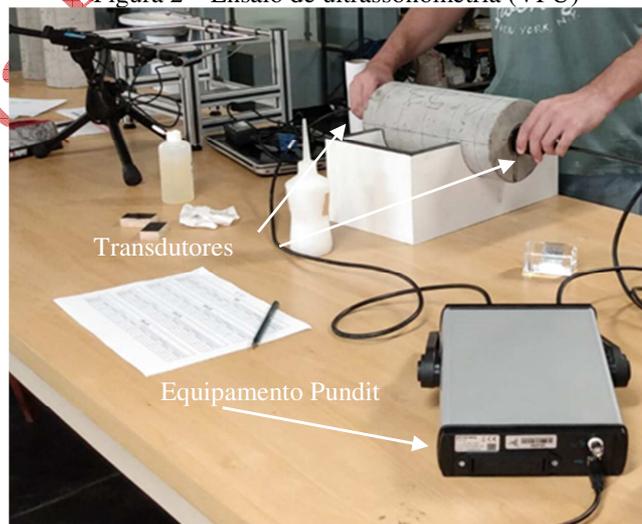
Tabela 2 – Programa experimental desenvolvido

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

Fonte: dados da pesquisa

O ensaio de VPU foi realizado conforme recomendações da ABNT NBR 8802 (ABNT, 2019), utilizando-se um equipamento tipo Pundit, fabricado pela empresa Proceq. Na Figura 2 ilustra-se 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 quanto ao acoplamento e a pressão entre as superfícies dos transdutores e do concreto, sendo os valores considerados satisfatórios quando da ausência de variação entre as leituras.

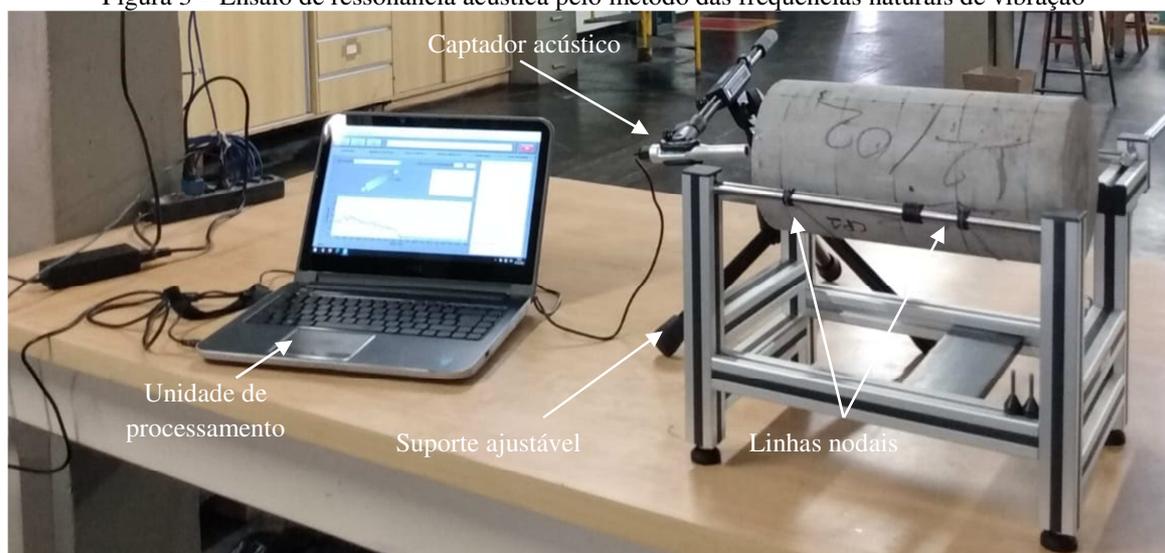
Figura 2 – Ensaio de ultrassonometria (VPU)



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-se as recomendações da ABNT NBR 8522-2 (ABNT, 2021) e utilizando-se o equipamento denominado por Sonelastic (Figura 3), fabricado pela empresa ATCP Engenharia Física. Os resultados obtidos deste 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.

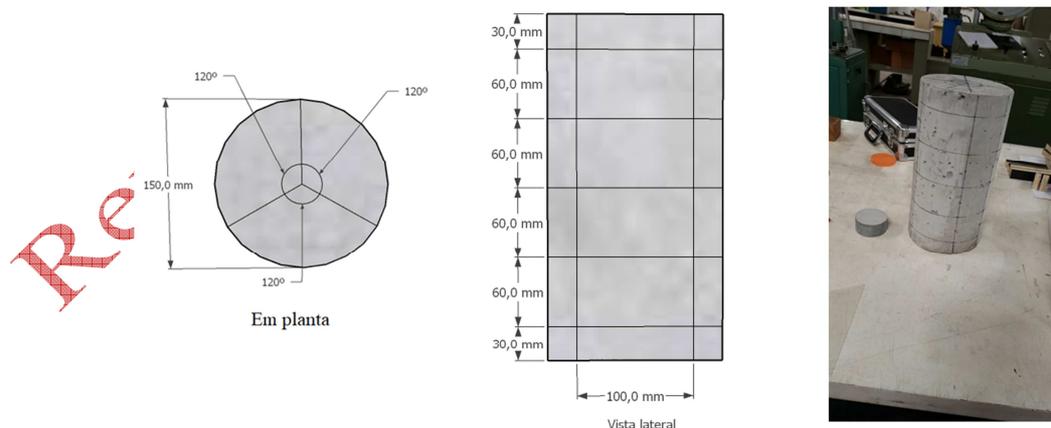
Figura 3 – Ensaio de ressonância acústica pelo método das frequências naturais de vibração



Fonte: arquivo dos autores

O ensaio de esclerometria (IE) foi realizado conforme as recomendações da ABNT 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, 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 é 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, capacidade de 600 kN, conforme é mostrado na Figura 5b.

Figura 5 – Ensaio de esclerometria (a) e módulo de elasticidade estático (b)



Fonte: arquivo dos autores

3 Resultados e discussões

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

3.1 Propriedades mecânicas dos concretos

Na Tabela 3 são apresentados 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 (σ) e coeficiente de variação (CV em %) dos resultados referentes as idades de 7, 28 e 56 dias.

Tabela 3 – Valores médios das propriedades mecânicas dos concretos

Grupos	Propriedades	7 dias	σ	CV	28 dias	σ	CV	56 dias	σ	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

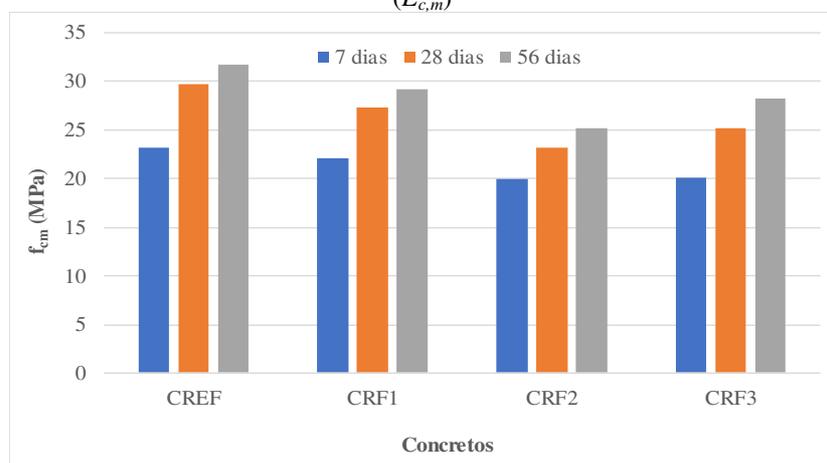
Fonte: dados da pesquisa

O valor da resistência à compressão do concreto convencional (CREF) aos 28 dias de idade foi aquele previamente planejado pela dosagem (29,68 MPa), sendo possível considerá-lo como classe C30. Dentre todos os concretos, o maior valor médio de resistência à compressão foi de 31,63 MPa, referente ao concreto CREF na idade de 56 dias e o menor valor foi de 19,93 MPa do concreto CRF2 na idade de 7 dias.

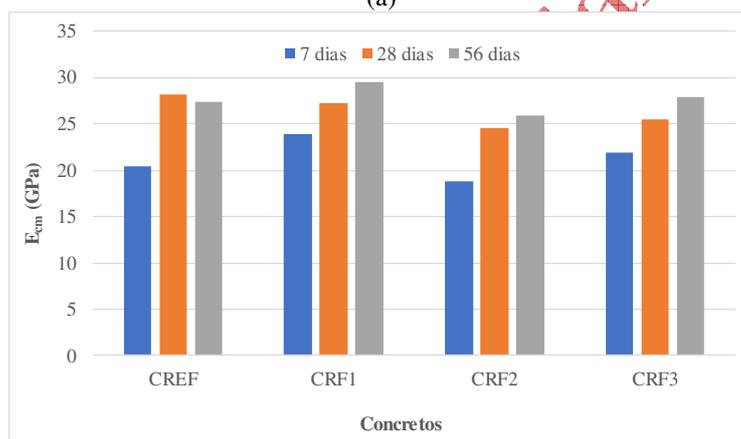
A adição de fibras reduziu a resistência à compressão dos concretos. As reduções nas idades de 7, 28 e 56 dias foram, respectivamente de 4,66%, 14,02% e 13,59% para o grupo CRF1, 8,19%,

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 valor de coeficiente de variação foi de 12,24% para o concreto CRF1 na idade de 7 dias, sendo o único resultado de CV acima de 10%, portanto, há uma 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 ($E_{c,m}$)



(a)



(b)

Fonte: dados da pesquisa

O efeito da diminuição na resistência à compressão do concreto com a presença das fibras de aço também foi verificado em outras pesquisas. Bauer *et al.* (2020) relataram que nenhuma das misturas com presença de fibras apresentou valor superior ao traço de referência, indicando que a adição desses elementos não contribuiu para o aumento da resistência à compressão. Na mesma linha de constatação citam-se as pesquisas de Prathap, Kumar e Narayana (2017), Abbas, Khan e Mourad (2018) e Avelar e Ferrari (2022).

Todos os concretos apresentaram aumento gradativo 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 respectivamente 28,04% e 36,45%. Já nos concretos com fibras CRF1, CRF2 e CRF3, esse aumento foi, respectivamente, 23,30% e 31,90%, 15,91% e 26,09%, 25,71% e 40,94%.

O maior valor obtido de módulo foi de 29,42 GPa do grupo CRF1 na idade de 56 dias e o menor valor foi de 18,80 GPa do grupo CRF2 na idade de 7 dias. Em relação ao coeficiente de variação, o maior valor encontrado foi de 7,20% do grupo CRF2 na idade de 56 dias, apresentando assim, boa representatividade devido a todos os valores de CV estarem abaixo de 10%. É notado para os concretos CRF1, CRF2 e CRF3 aumento no valor do módulo com a evolução das idades. Já para o

CREF observa-se aumento no valor do módulo entre as idades de 7 e de 28 dias, sendo constante o valor obtido aos 56 dias de idade (Figura 6b).

3.2 Ensaio não destrutivos

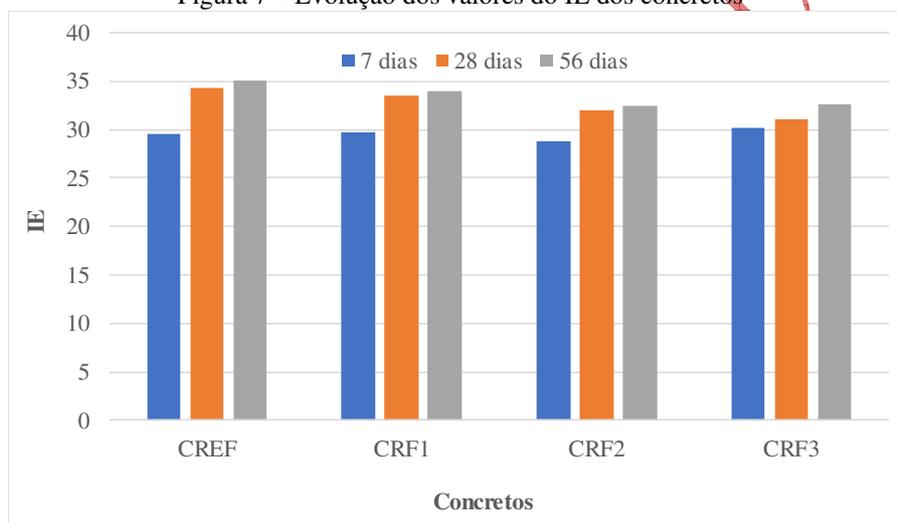
A Tabela 4 apresenta os valores médios do IE para os CPs cilíndricos juntamente com o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CV em %) dos resultados. Na Figura 7 os valores obtidos são representados graficamente para melhor visualização.

Tabela 4 – Valores médios do IE

Grupos	7 dias	σ	CV	28 dias	σ	CV	56 dias	σ	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

Fonte: dados da pesquisa

Figura 7 – Evolução dos valores do IE dos concretos



Fonte: dados da pesquisa

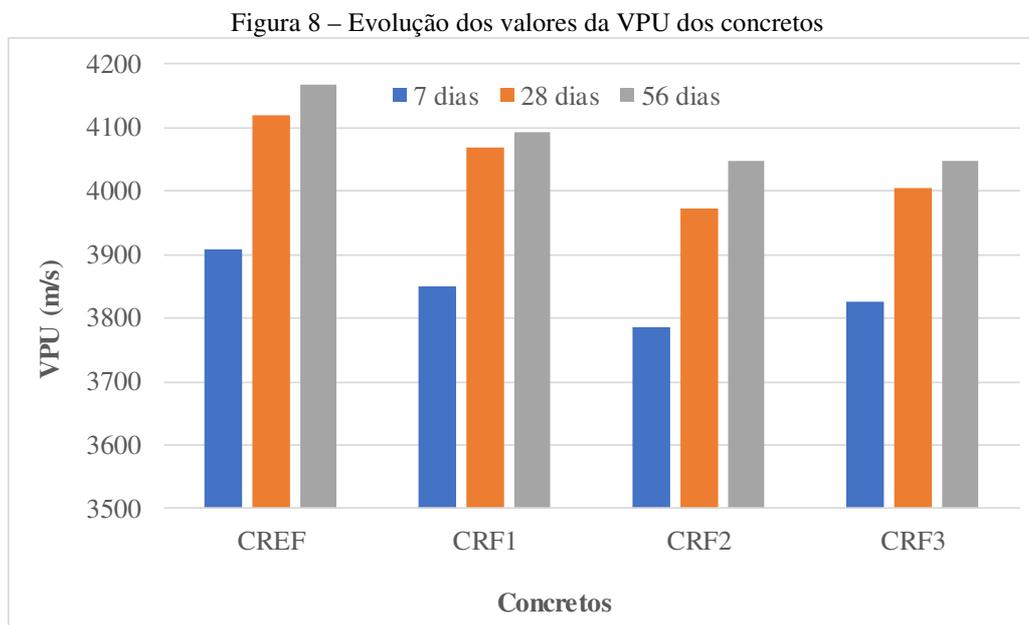
O maior valor médio do IE nos CPs cilíndricos foi de 35,05 no concreto CREF na idade de 56 dias e o menor valor foi de 28,87 no concreto CRF2 na idade de 7 dias. O maior valor de coeficiente de variação foi de 3,24% para o concreto CRF1 na idade de 7 dias, apresentando assim, boa representatividade devido aos valores abaixo de 10%. Fica evidenciado que os valores do IE para o concreto sem fibras são sempre maiores aos valores dos concretos com fibras, exceto na idade de 7 dias para os grupos CRF1 e CRF3.

A Tabela 5 apresenta os valores médios da VPU juntamente com o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CV – em %) dos resultados e 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)

Grupos	7 dias	σ	CV	28 dias	σ	CV	56 dias	σ	CV
CREF	3907	45	1,15	4120	18	0,45	4168	18	0,42
CRF1	3849	71	1,84	4068	41	1,00	4093	20	0,50
CRF2	3785	10	0,26	3972	17	0,44	4046	11	0,27
CRF3	3825	24	0,62	4005	22	0,56	4047	34	0,84

Fonte: dados da pesquisa



Fonte: dados da pesquisa

O maior valor médio da VPU nos CPs cilíndricos foi de 4168 m/s no concreto CREF na idade de 56 dias e o menor valor foi de 3785 m/s no concreto CRF2 na idade de 7 dias. O maior valor de coeficiente de variação foi de 1,84% para o concreto CRF1 na idade de 7 dias, apresentando assim, boa representatividade devido aos valores abaixo de 10%. Como se vê, a resposta da VPU deu-se de forma que os maiores valores sempre foram aqueles registrados para o concreto sem fibras e aumentando-se 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, mas sempre inferior ao CRF1.

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

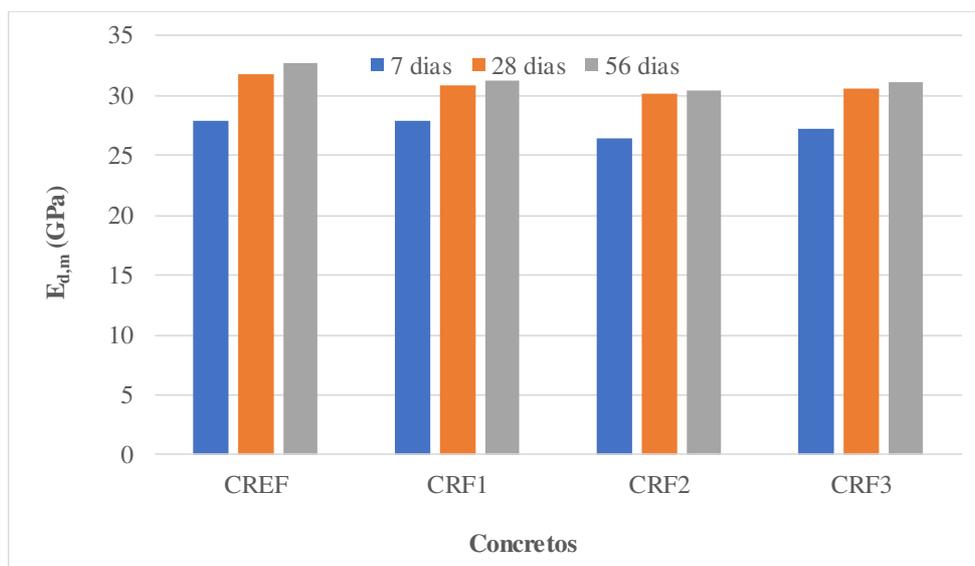
A Tabela 6 mostra os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico ($E_{d,m}$), o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CV em %) dos resultados. Na Figura 9 os resultados são representados de forma gráfica.

Tabela 6 – Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos (GPa)

Grupos	7 dias			28 dias			56 dias		
	$E_{d,m,7}$	σ	CV	$E_{d,m,28}$	σ	CV	$E_{d,m,56}$	σ	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

Fonte: dados da pesquisa

Figura 9 – Evolução dos valores do E_d dos concretos



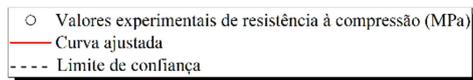
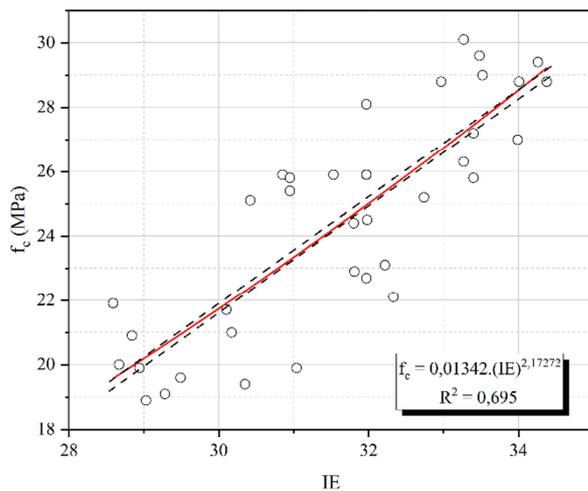
Fonte: dados da pesquisa

O maior valor médio obtido de módulo foi de 32,72 GPa do grupo CREF na idade de 56 dias e o menor valor foi de 26,46 GPa, do grupo CRF2, na idade de 7 dias. Em relação ao coeficiente de variação, o maior valor foi de 4,53% para o grupo CRF1 na idade de 7 dias, logo, boa representatividade dos resultados foi obtida devido a concentração dos valores com CV abaixo de 5%. Como podem ser observados, os valores do módulo dinâmico para o concreto sem fibras são superiores aos dos concretos com fibras para todas as idades. Quando da adição de fibras, ocorreu então, diminuição nos valores do módulo dinâmico.

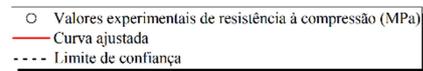
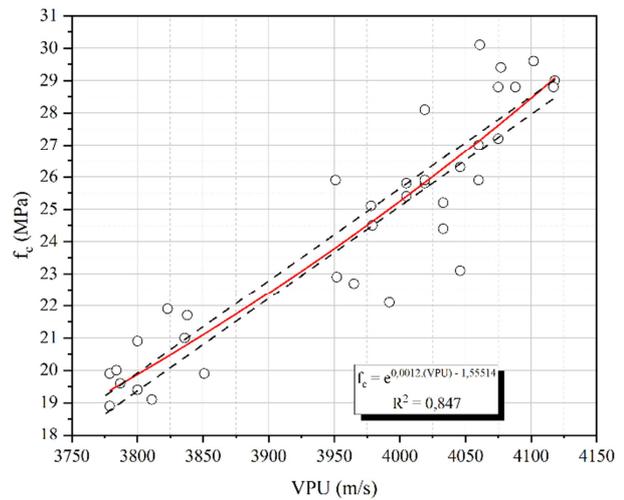
3.3 Correlações para a estimativa da resistência à compressão (f_c)

Na Figura 10 são indicadas as curvas de correlação simples ($IE \times f_c$) e ($VPU \times f_c$) e de correlação combinada ($IE \times VPU \times f_c$) para os grupos de CRFA. É também indicada a equação representativa de cada curva e o respectivo coeficiente de determinação R^2 . A unidade da resistência f_c é em MPa, e a VPU é em m/s para as correlações simples e em km/s para a correlação combinada. O critério para selecionar a curva que melhor se ajustasse aos dados experimentais teve como base o R^2 , o desvio padrão residual (S_{res}) e o parâmetro estatístico “ α ” igual a S_{res} dividido pelo valor médio de f_c ou E_c .

Figura 10 – Curvas de correlação. (a) $IE \times f_c$. (b) $VPU \times f_c$ (c) $VPU \times IE \times f_c$



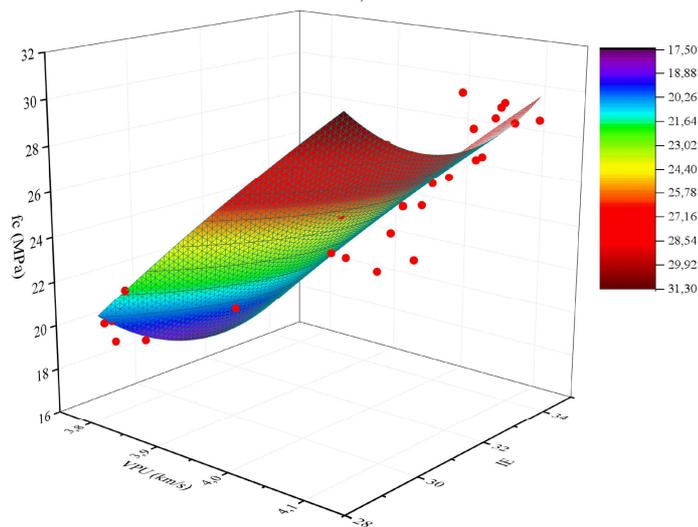
(a)



(b)

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

$$R^2 = 0,857$$



(c)

Fonte: dados da pesquisa

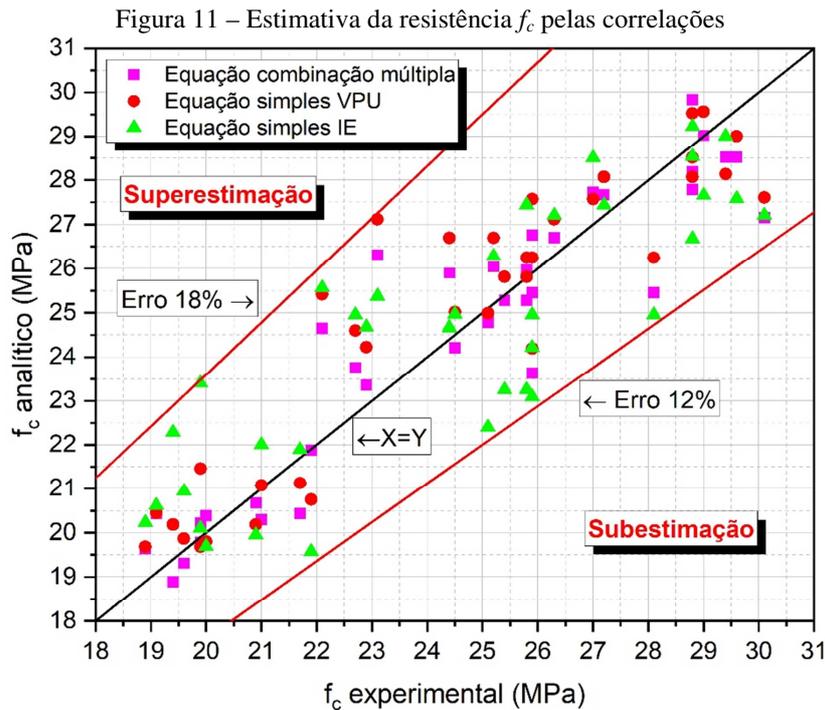
A correlação ($IE \times f_c$) foi estabelecida por meio de uma curva representada por uma equação do tipo potência (Equação 1) com R^2 igual a 0,695, S_{res} igual a 1,92 MPa e α de 7,87%. A correlação ($VPU \times f_c$) foi dada por uma equação do tipo exponencial (Equação 2) com R^2 de 0,847, S_{res}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

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

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

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

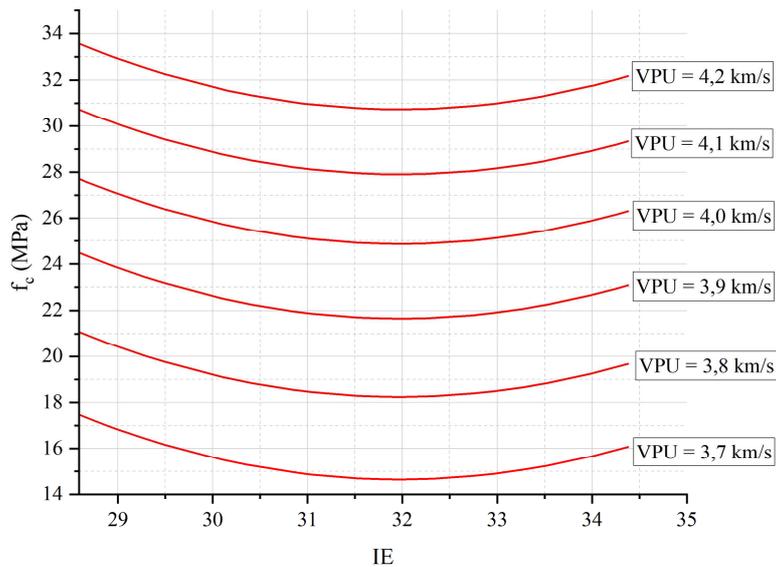
Na Figura 11 apresenta-se a comparação entre os valores experimentais de resistência à compressão (f_c experimental) e os valores analíticos (f_c analítico) estimados por meio das equações representativas das correlações anteriormente indicadas. É observado que os resultados representados pelos diversos pontos se encontram próximos da linha de igualdade ($X = Y$), o que demonstra elevada assertividade das equações para a estimativa da resistência à compressão dos concretos. Os erros associados com a superestimativa e a subestimativa dos resultados limitam-se, respectivamente, a 18% e a 12%.



Fonte: dados da pesquisa

Os resultados com a correlação simples obtida com o IE foram os que apresentaram os maiores erros percentuais e os resultados com a correlação obtida com a VPU limitaram-se a erros percentuais abaixo de 10%, sendo apenas 2 pontos acima desse valor. O estabelecimento da correlação combinada praticamente não resultou em melhoria na assertividade quanto a estimativa dos resultados, permanecendo semelhante (1,20% de diferença) ao que foi obtido com a correlação simples a partir da VPU. Mesmo assim, deve ser destacado que o uso combinado de END é sempre recomendado, pois possibilita a obtenção de resultados mais confiáveis no sentido de que o resultado de um END é referencial para o outro. Considerando a importância da correlação combinada, apresenta-se na Figura 12 um ábaco para a 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

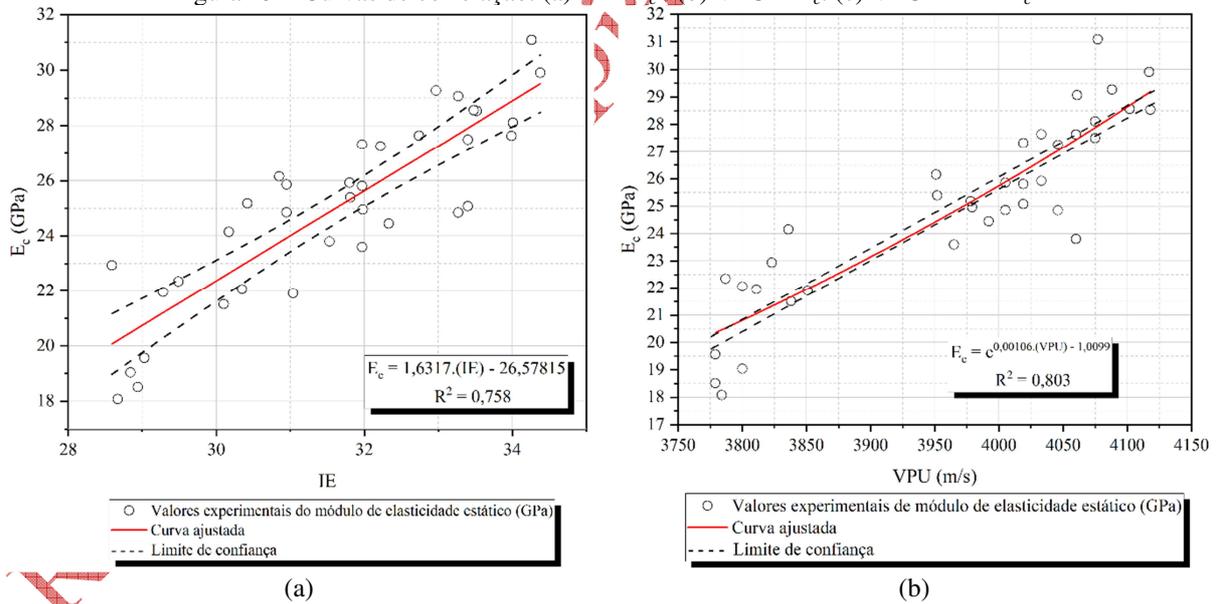


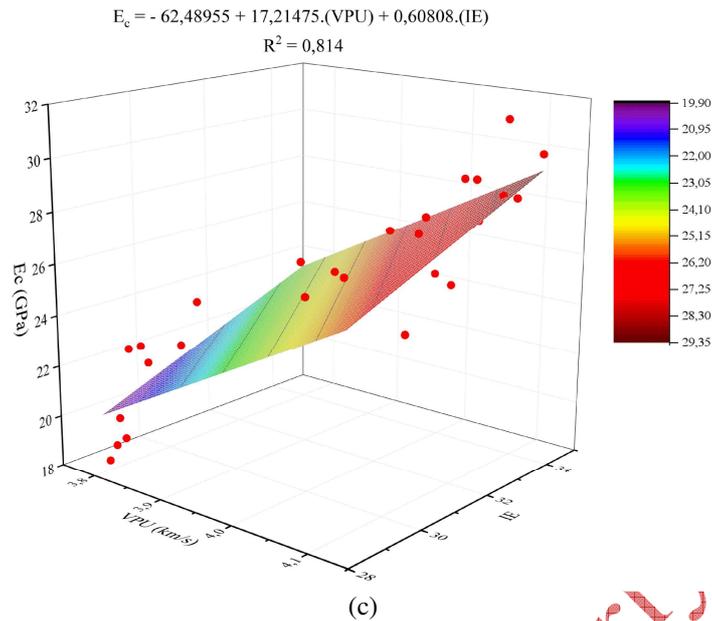
Fonte: dados da pesquisa

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

Na Figura 13 são indicadas as curvas de correlação simples ($IE \times E_c$) e ($VPU \times E_c$) e de correlação combinada ($IE \times VPU \times E_c$) para os grupos de CRFA. É também indicada a equação representativa de cada curva e o respectivo coeficiente de determinação R^2 . A unidade de E_c é em GPa e a VPU para as correlações simples é em m/s e, em km/s para a correlação múltipla.

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

A correlação (IE \times E_c) foi estabelecida por meio de uma curva representada por uma equação do tipo linear (Equação 4) com R^2 igual a 0,758, S_{res} igual a 1,61 GPa e α de 6,45%. A correlação (VPU \times E_c) por uma equação do tipo exponencial (Equação 5) com R^2 de 0,803, S_{res} igual a 1,53 GPa e α de 6,12%. A correlação combinada foi representada por uma equação linear (Equação 6) com R^2 igual a 0,814, S_{res} igual a 1,39 GPa e parâmetro α de 5,57%.

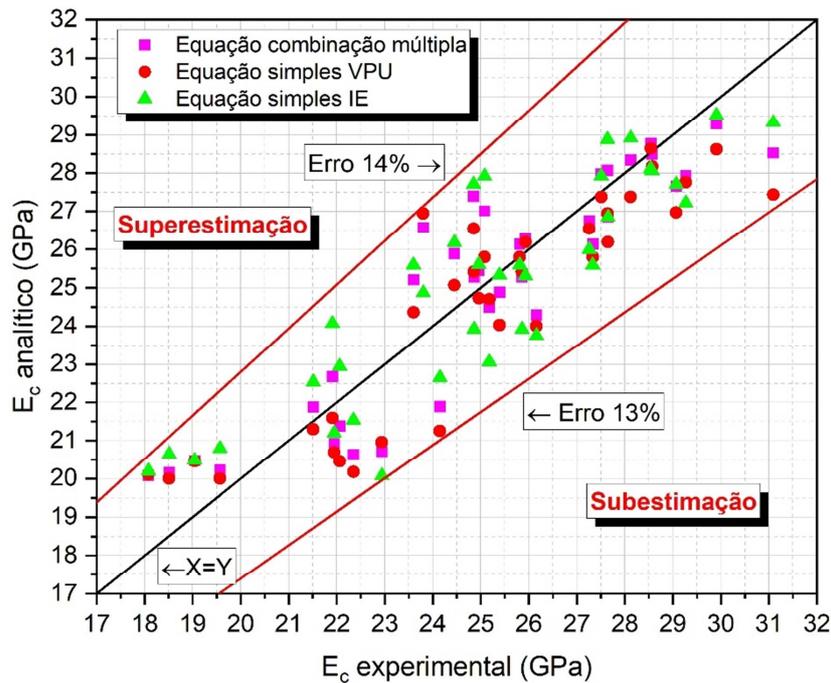
$$E_c = 1,6317(IE) - 26,57815 \quad (4)$$

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

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

Na Figura 14 apresenta-se a comparação entre os valores experimentais do módulo estático (E_c experimental) com os valores analíticos (E_c analítico) estimados por meio das equações representativas das correlações indicadas.

Figura 14 – Estimativa do E_c pelas correlações



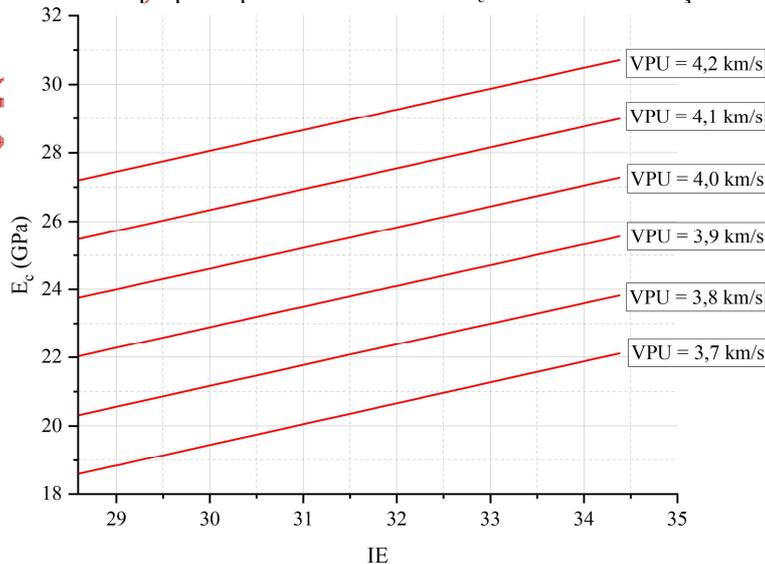
Fonte: dados da pesquisa

É observado que os resultados representados pelos diversos pontos se encontram próximos da linha de igualdade ($X = Y$), o que demonstra elevada assertividade das equações para estimativa do módulo de elasticidade do CRFA. Os erros associados com a superestimativa e a subestimativa dos resultados limitam-se, respectivamente a 14% e a 13%.

Pelos resultados obtidos verifica-se que não houve discrepância entre as três equações sendo que os erros percentuais são semelhantes entre elas, ou seja, 13,20% para a VPU, 12,50% para o IE e de 11,66% para a correlação combinada.

O mesmo efeito para a estimativa da resistência (f_c) foi também observado para a estimativa do E_c , ou seja, a correlação combinada dos resultados, IE e VPU, pouco melhorou (1,37%) a assertividade dos resultados para a estimativa do módulo de elasticidade (E_c). É apresentado na Figura 15 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 ilustra a relação E_d/E_c para cada concreto com a idade. A menor relação obtida foi do grupo CRF1, na idade de 56 dias, e igual a 1,06. A maior relação obtida foi do CRF2 com 7 dias e igual a 1,40. Como mostrado, os valores do módulo dinâmico são superiores aos do módulo estático. Para o concreto sem fibras, a diferença entre os valores mostrou ser maior na primeira idade em relação as demais. Essa mesma tendência foi observada nos concretos contendo fibras, ou seja, os valores do módulo dinâmico tendem a se aproximar do estático com o avanço da idade.

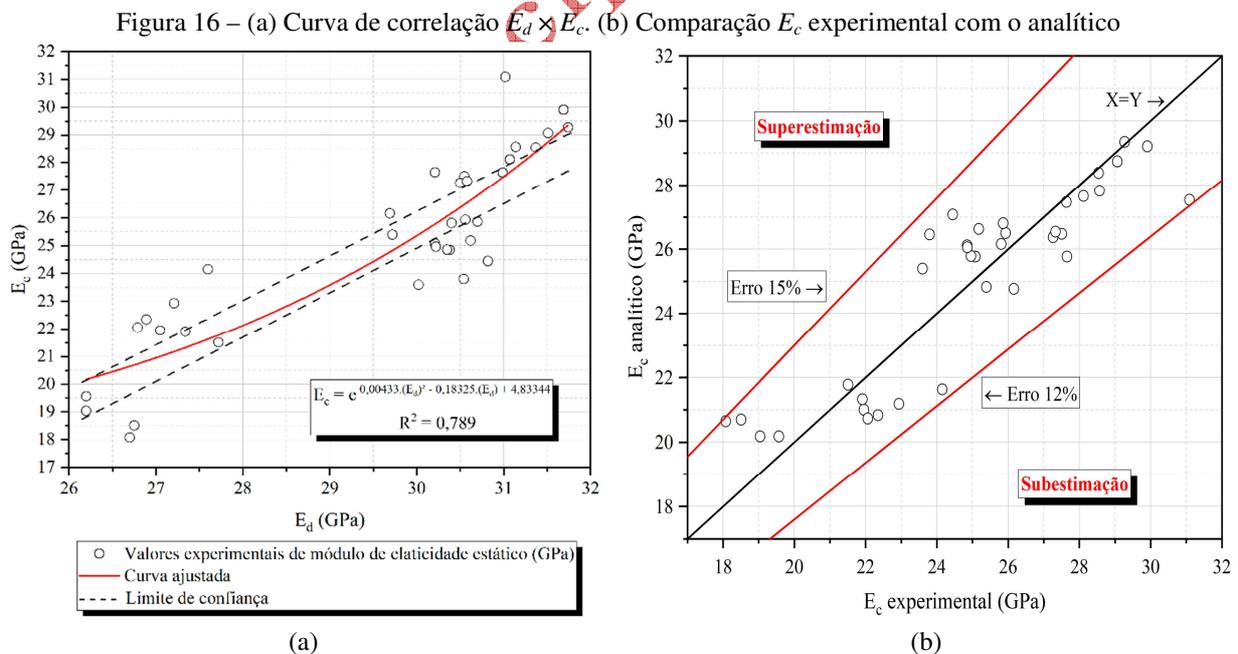
Tabela 7 – Relação entre os módulos de elasticidade dinâmico (E_d) e estático (E_c)

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

Fonte: dados da pesquisa

O estudo de correlação entre os módulos de elasticidade ($E_d \times E_c$), considerando-se somente os grupos de CFRA, é indicado na Figura 12. A curva foi melhor representada por uma equação do tipo exponencial (Equação 7) com R^2 igual a 0,789, S_{res} igual a 1,48 GPa e parâmetro α de 5,94%. Na Figura 16 indica-se também a comparação entre os valores experimentais de módulo de elasticidade estático (E_c experimental) com os valores analíticos (E_c analítico) estimados por meio da equação representativa da correlação dos concretos contendo fibras. Como se vê a faixa representativa do intervalo referente ao erro ficou entre 15% a 12% para superestimativa e subestimativa, respectivamente.

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



Fonte: dados da pesquisa

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

- Para concretos sem fibras até 30 MPa: $E_c = 0,83 \cdot E_d$ com $R^2 = 0,661$;

- Para concretos contendo fibras de aço até 30 MPa: $E_c = 0,85 \cdot E_d$ com $R^2 = 0,615$;
- Para concreto contendo fibras até 30 MPa contendo 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 presente 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 voltados para a estimativa das propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade estático), por meio de correlações simples e combinadas com os resultados dos ensaios destrutivos, geradas a partir de 3 grupos de concretos variando-se a taxa de fibras (0,35%, 0,70% e 1,05%). Os ensaios para as correlações foram realizados nas idades de 7, 28 e 56 dias. A partir do referido programa experimental e pela quantidade de resultados obtidos, foi possível extrair as seguintes conclusões:

- 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 redução na resistência à compressão dos concretos. Comparado ao concreto sem fibras e aos 28 dias de idade, as reduções foram de 14,02%, 22,17% e 20,55% para as taxas de 0,35%, 0,70% e 1,05%, respectivamente;
- Na idade de 28 dias, os valores do módulo de elasticidade estático para os concretos com fibras foram inferiores ao concreto sem fibras;
- Os valores do IE para o concreto sem fibras foram sempre maiores aos valores dos concretos contendo fibras, exceto na idade de 7 dias, onde nos grupos CRF1 e CRF3 foram observados valores suavemente superiores ao CREF;
- Aos 7 dias de idade, os valores de IE para os concretos contendo fibras foram praticamente iguais. Para as idades de 28 e 56 dias, os valores do IE para o concreto CREF são maiores do que os valores dos concretos com fibras e foi constatada uma tendência de diminuição do valor do IE com o aumento do teor de fibras;
- Valores da VPU para o concreto CREF foram superiores aos concretos contendo fibras, independentemente da idade analisada. Ficou evidenciada tendência de diminuição dos valores da VPU do CREF para os concretos CREF1 e CREF2, entretanto, para o CREF3 essa tendência não foi verificada;
- O comportamento da resposta do E_d foi o mesmo observado para a VPU, ou seja, 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 daqueles obtidos para o CREF2;
- A melhor correlação entre o IE e f_c dos concretos com fibras foi obtida por meio de uma equação do tipo potência com grau de determinação R^2 igual a 0,695, desvio padrão residual S_{res} igual a 1,92 MPa e parâmetro α de 7,87%. A faixa de erros para a estimativa da resistência ficou limitada entre 20% para superestimativa e 14% para subestimativa;
- A melhor correlação entre a VPU e f_c dos concretos com fibras foi obtida por meio de uma equação do tipo exponencial com R^2 igual a 0,847, desvio padrão residual S_{res} igual a 1,43 MPa e parâmetro α de 5,83%.
- A correlação combinada entre VPU, IE e f_c não resultou em aumento significativo no grau de determinação (R^2 igual a 0,857) quando comparada com o obtido pela correlação simples $VPU \times f_c$, desvio padrão residual S_{res} igual a 1,26 MPa e parâmetro α de 5,14%.
- Foi obtida uma correlação razoável entre o IE e E_c via equação do tipo linear com R^2 igual a 0,758, desvio padrão residual S_{res} igual a 1,61 GPa e parâmetro α de 6,45%.
- A melhor correlação entre a VPU e E_c foi obtida por meio de uma equação do tipo exponencial com R^2 igual a 0,803, desvio padrão residual S_{res} igual a 1,53 GPa e parâmetro α de 6,12%.

- A melhor correlação combinada entre a VPU, IE e E_c não apresentou aumento significativo no valor do coeficiente de determinação (R^2 igual a 0,814), comparado com o obtido pela 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 considerando os concretos contendo fibras foi melhor representada por uma equação do tipo exponencial com R^2 igual a 0,789, desvio padrão residual S_{res} igual a 1,48 GPa e parâmetro α de 5,94%.
- O módulo de elasticidade estático dos concretos com fibras estudados na pesquisa foi estimado a partir do módulo estático, dentro de uma faixa de assertividade entre 15% e 12% para superestimativa e subestimativa, respectivamente.

A partir dos resultados obtidos e conclusões, seguem como indicações de futuros trabalhos: estabelecimento de correlações dos ENDs com a resistência à tração na flexão do CRFA, estudo com outros teores, 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.

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 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 16916**: Agregado miúdo: Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

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

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

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

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

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, 2021f.

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, 2021g.

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, 2021h.

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 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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.; TUTILIAN, 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. **Non-destructive assessment of concrete structures**: reliability and limits of single and combined techniques. Dordrecht: Springer, 2012. 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, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13047>.

CHEN, L.; MINDESS, S.; MORGAN, D. R.; SHAH, S. P.; JOHNSTON, C. D.; PIGEON, M.

Comparative toughness testing of fiber reinforced concrete. **ACI Special Publication**, v. 155, p. 41-75, 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. 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>.

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>.

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) – 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) – 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.