

Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END)

Compressive strength and elasticity module of concrete using non-destructive techniques (NDT)

Marcos Vinício de Camargo¹, Vladimir José Ferrari²

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PCV/UEM, Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, Av. Colombo, 5790, Jd. Universitário, CEP 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PCV/UEM, Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, Avenida Colombo, 5790, Jd. Universitário, CEP 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.
e-mail: marcos.v.camargo@hotmail.com, vladimirjf@hotmail.com

RESUMO

A resistência à compressão do concreto e seu módulo de elasticidade são propriedades mecânicas de fundamental importância no projeto de novas estruturas. Para o caso ainda de estruturas já existentes que, porventura tenham a necessidade de serem reforçadas, as estimativas das propriedades do concreto existente são necessárias para o cálculo da capacidade de carga do elemento estrutural. A presente pesquisa tem como objetivo apresentar parâmetros para a estimativa das propriedades mecânicas do concreto (resistência à Compressão e módulo de Elasticidade) por meio de ensaio não-destrutivos (END) e estabelecimento de curvas de correlação em concretos com resistência nominal classes C20 a C50. Para a elaboração das curvas fez-se uso de três métodos não destrutivos, entre eles, o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU), índice esclerométrico (IE) e o ensaio de resposta acústica (RA). Para estimar as propriedades de resistência (f_c) e módulo (E_c) foram desenvolvidas curvas de correlação simples, IE x f_c e VPU x f_c e múltiplas VPU x IE x f_c . A partir da correlação múltipla foram elaboradas curvas de Iso-resistência conforme a metodologia denominada SonReb. Para a estimativa do módulo de Elasticidade estático (E_c), fez-se um estudo de correlação com módulo dinâmico (E_d). Os resultados demonstram que há relação entre os módulos, bem como a influência da resistência à compressão do concreto na determinação do módulo de elasticidade dinâmico. A estimativa das propriedades do concreto por meio de curvas de correlação apresentou resultados satisfatórios, onde, as equações analíticas apresentaram margem de erro menores do que 10%.

Palavras-chave: Ensaios não-destrutivos, Esclerometria, Ultrassom, SonReb.

ABSTRACT

The compressive strength of concrete and its modulus of elasticity are mechanical properties of fundamental importance in the design of new structures. For the case of existing structures that may need to be reformed, such as capturing existing concrete properties, they will be considered for the calculation of the load capacity of the structural element. The present research aims to present configurations for estimating concrete mechanical properties (compressive strength and modulus of elasticity) by means of non-destructive techniques (NTDs) and establishing correlation analyzes in concrete with nominal strength classes C20 to C50. For the elaboration of the test for the use of three non-destructive techniques, among them, the ultrasonic pulse velocity test (UPV), the rebound number (RN) and the acoustic response test (RA). In order to estimate compressive strength (f_c) and modulus (E_c), simple correlation forms were, RN x f_c and UPV x f_c and multiple UPV x RN x f_c . From the selected correlation, ISO-strength curves were drawn up, according to a methodology called SonReb. To calculate the static elastic modulus (E_c), he did a correlation study with the dynamic modulus (E_d). The results demonstrate that there is a relationship between, as well as the influence of the compressive strength of the concrete in determining the dynamic elastic modulus. An estimate of the properties of the concrete by means of correlation curves presents satisfactory results, where, as analytical equations,

it found a smaller margin of error less than 10%.

Keywords: non-destructive tests, Rebound number, Ultrasonic Pulse Velocity, SonReb.

1. INTRODUÇÃO

Parâmetros como a resistência à compressão (f_c) e o módulo de elasticidade (E_c) são de fundamental importância para o dimensionamento de projeto de Estruturas de concreto. Conforme MACHADO *et al.* [1], é necessário assegurar que a resistência e módulo de elasticidade especificados em projeto, sejam atendidos ao longo da execução e vida útil da estrutura.

Para as estruturas de concreto já existentes e mediante a eventual necessidade de intervenção por meio de um reforço estrutural, o conhecimento das propriedades mecânicas do concreto existente é uma informação essencial para o projeto de reforço, conforme especificado pelo ACI 440.2R [2].

Segundo o ACI 228.1R [3], os Ensaio Não Destrutivos (END) são métodos utilizados para o controle de qualidade de novas construções, para a solução de problemas em construções, avaliações das condições do concreto existente e para assegurar a qualidade dos reparos.

Segundo TSILOULOU *et al.* [4], os métodos de END são úteis para avaliação das condições das estruturas por meio de análise indireta das propriedades do concreto. Os referidos métodos, ainda segundo os autores, apresentam algumas vantagens como, redução do dano na estrutura pelo ensaio, relativa facilidade de execução e menor tempo necessário para a realização dos ensaios.

De acordo com ADAMATI *et al.* [5], diversos pesquisadores afirmam que os END têm sido empregados para identificação, localização e avaliação de falhas e defeitos em estruturas de concreto, bem como para o auxílio no estabelecimento à diagnósticos mais complexos.

O ACI 228.1R [3] também relata que na investigação das propriedades do concreto de estruturas existentes, os END têm sido cada vez mais utilizados por permitir a avaliação in situ da estrutura, com baixo custo na análise de grandes volumes de concreto, quando comparados com outros métodos e, a possibilidade de resultados em tempo real.

Existe um grande número de métodos de END, porém, segundo [3, 4, 6, 7], os dois mais comumente utilizados em aplicações in situ é o da Esclerometria por meio de seu Índice Esclerométrico (IE) e o da Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas (VPU).

Conforme TSILOULOU *et al.* [4], a Esclerometria é um ensaio rápido para a determinação da qualidade do concreto com base na dureza superficial. Em linhas gerais, a energia absorvida pelo concreto devido o impacto da massa do aparelho depende das características do concreto como seu módulo de elasticidade e resistência à compressão. Já a VPU é um ensaio baseado na medida da velocidade do pulso ultrassônico no concreto, gerado por um transdutor eletro-acústico, conforme descrito em IS 13311 [8] e BS 12504-4 [9].

Autores como [6, 10, 11], comentam que a estimativa da resistência à compressão do concreto deve ser estabelecida por meio de correlação e análise de regressão. Ainda, a maioria dos fabricantes de equipamentos para END fornecem relações, generalizadas, na forma de gráficos ou equações que procuram relacionar a propriedade medida pelo aparelho com a do concreto. No entanto, essas relações, na maioria das vezes, não representam o concreto que está sendo investigado e, portanto, não devem ser utilizadas, ao menos que a validade delas tenham sido estabelecidas por meio de correlações em concreto similar àquele em questão.

O ACI 228.1R [3] cita que a utilização de END in situ deve ser acompanhada por curvas de correlação, obtidas a partir de ensaios realizados em laboratório por meio de corpos de prova cilíndricos ou cúbicos, feitos com o mesmo material utilizado na estrutura a ser avaliada. Nesses corpos de prova são realizadas medições por meio de END que, em seguida são submetidos a ensaios destrutivos.

MACHADO *et al.* [1], apresentaram a determinação de curvas de correlação simples e combinada para a estimativa da resistência à compressão e módulo de elasticidade para concretos produzidos na região do Rio de Janeiro, variando-se a relação a/c e a característica petrográfica do agregado graúdo. FAVARATO *et al.* [12], compararam resultados teóricos com valores experimentais para a estimativa da resistência à compressão de concretos com diferentes dosagens, tipos de cimentos e idades, encontrando-se boa correlação entre os resultados experimentais e as equações analíticas estudadas.

LIM e CAO [13] indicam a combinação múltipla entre diferentes métodos de END para a obtenção de maior nível de confiabilidade dos resultados. Segundo [14, 6], a combinação de mais de um método de END tem-se tornado mais popular, pois oferece maior confiabilidade e menores erros quando comparado a resultados obtidos com a utilização de apenas um método. O método SonReb é um desses métodos, segundo os referidos autores e, é baseado na combinação dos resultados dos ensaios de esclerometria e VPU.

Conforme ainda [14, 6], o método SonReb é mais preciso do que aquele com a utilização isolada de apenas um END, pois leva em conta dois parâmetros (IE e VPU) que são influenciados de diferentes formas por fatores relacionados à densidade e dureza da superfície do concreto analisado. A metodologia SonReb

tem como referência os procedimentos indicados na RILEM NTD 43 [15] que, indica a combinação dos ensaios END propondo-se a construção de curvas de Iso-resistência.

A combinação de mais de um END para a elaboração de curvas de correlação é cada vez mais utilizada, pois, como exposto, tem como principal função proporcionar aumento do nível de confiabilidade dos resultados. Nesse sentido, na pesquisa desenvolvida por EVANGELISTA [16] foi apresentado uma melhora de 3% a 16% no coeficiente de determinação para a estimativa da resistência à compressão do concreto utilizando-se métodos combinados entre os ensaios VPU x IE x f_c . Já VICENTINI e FERRARI [17], encontraram uma melhora na estimativa da resistência à compressão do concreto de 7% quando da utilização da combinação múltipla entre os ensaios VPU x IE x f_c .

A pesquisa aqui apresentada foi desenvolvida na busca de fornecer parâmetros para a estimativa da resistência à compressão do concreto por meio de END usando-se a Esclerometria e a Ultrassonometria aplicados em corpos de prova cilíndricos. Os traços foram elaborados para concretos delimitados na classe C20 a C50 e foram utilizados corpos de prova cilíndricos 150 x 300 mm. Adicionalmente, fez-se a avaliação do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) desses concretos utilizando-se o ensaio de ressonância acústica através da técnica de excitação por impulso. Os módulos de elasticidade, estático e dinâmico, foram relacionados e a equação obtida é apresentada. Os END foram também combinados tendo-se como referência a metodologia indicada na RILEM NTD 43 [15], método SonReb e as curvas de Iso-Resistência foram propostas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados na produção dos concretos foram Cimento Portland (CP II-Z32), areia, brita e aditivo plastificante. A areia utilizada tem massa específica de 2,64 kg/dm³, com módulo de finura de 2,14 mm e diâmetro máximo característico de 1,18 mm. A brita foi classificada como brita 1, com diâmetro máximo de 19 mm e massa específica de 2,82 kg/dm³.

Para a representatividade da pesquisa foram moldadas cinco distintas composições de concreto variando-se a relação água/cimento (a/c) e material seco com vistas à obtenção de resistências à compressão no intervalo de 20 a 50 MPa. Os traços são os indicados na Tabela 1 e foram obtidos através da metodologia de dosagem proposta por ASSUNÇÃO [18].

Tabela 1: Traços dos concretos.

CONCRETO	CIMENTO [kg]	AREIA [kg]	BRITA [kg]	A/C	ADITIVO PLASTIFICANTE %	SLUMP TEST [mm]
C1	1,00	2,77	3,48	0,60	0	110
C2	1,00	2,44	3,17	0,54	0	90
C3	1,00	1,83	2,72	0,48	0	100
C4	1,00	1,71	2,60	0,42	0,30	70
C5	1,00	1,24	2,15	0,34	0,50	100

Os concretos foram produzidos de acordo com as recomendações da ABNT NBR 12655 [19] e moldados conforme a ABNT NBR 5738 [20]. Após a moldagem, os corpos de prova cilíndricos permaneceram no molde por 24h à temperatura ambiente e, após desmoldados, foram direcionados à câmara úmida, onde permaneceram até 48h antes da realização dos ensaios. Buscando estudar o comportamento dos concretos aqui desenvolvidos, realizou-se as análises dos resultados sempre com o dobro da idade do ensaio anterior, conforme pesquisas desenvolvidas por [10, 17], neste contexto, foram adotadas as idades de 14, 28 e 56 dias para os ensaios de cada corpo de prova. Além disso, os ensaios foram iniciados na idade de 14 dias para assegurar maior período de hidratação do cimento de forma a se obter diferenças significativas nas resistências entre os concretos estudados.

O ensaio de determinação da VPU foi realizado conforme os procedimentos indicados na ABNT NBR 8802 [21]. Os transdutores do equipamento foram devidamente calibrados por meio de barra de referência. Fez-se o uso de vaselina na superfície de concreto do corpo de prova para uma transmissão da onda ultrassônica mais eficiente entre o transdutor e o concreto. O equipamento utilizado foi o do tipo Pundit Lab fabricado pela empresa Proceq. Segundo a BS 12504-4 [9], o comprimento de propagação da onda deve ser suficiente para não influenciar nos resultados devido à natureza heterogênea do concreto. Assim, recomenda-se um comprimento de 100 mm para concretos contendo agregados com dimensão máxima nominal de 20 mm. Ainda a ABNT NBR NM 58 [22] indica que a distância mínima a ser percorrida pela onda ultrassônica proveniente de transdutores de frequência de 54 kHz seja igual a 150 mm. Na pesquisa, considerando-se o aten-

dimento às prescrições das referências [9, 22], fez-se a utilização de transdutores de 50 mm de diâmetro e frequência de 54 kHz.

Para obter maior precisão durante a realização do ensaio foi confeccionado um suporte para evitar que o CP fosse movimentado durante a realização do procedimento e permitir melhor acoplamento dos transdutores. A Figura 1 ilustra o equipamento e a realização do ensaio de VPU. Para cada corpo de prova foram realizadas quatro leituras, atentando-se para que a diferença apresentada em cada uma delas não fosse superior a 1%.



Figura 1: Equipamento de Ultrassom e realização do ensaio.

O procedimento de ensaio de Esclerometria foi realizado de acordo com as orientações da ABNT NBR 7584 [23]. A área de ensaio em cada corpo de prova foi preparada por meio de polimento enérgico com disco de carborundum. A delimitação da área de ensaio foi feita por meio de um reticulado como é ilustrado na Figura 2. Cada corpo de prova foi então submetido a nove impactos distribuídos uniformemente na área de ensaio de forma a atender a distância mínima (30 mm) entre centros de dois pontos de impacto e distância mínima (50 mm) das arestas.

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura tendo-se como objetivo evitar vibrações e ressonância 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.

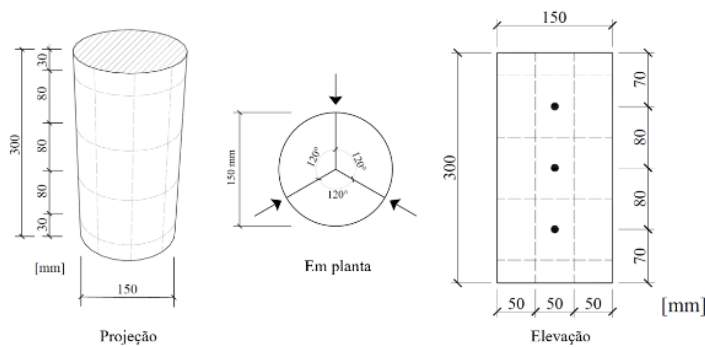


Figura 2: Posição dos pontos de ensaio de esclerometria nos corpos de prova.

Após realizadas 9 medições, a média aritmética foi calculada e analisou-se a necessidade de desprezar valores individuais que se distanciam mais que 10% da média obtida, conforme os procedimentos indicados na ABNT NBR 7584 [23]. O equipamento utilizado foi o Esclerômetro analógico de impacto Schmidt tipo N da Fortest, com energia de percussão de 2,25 N.m, mostrado na Figura 3.



Figura 3: Esclerômetro e realização dos ensaios de esclerometria nos corpos de prova.

Para a realização do ensaio de ressonância acústica foram adotados os procedimentos da ASTM E1876 [24], tendo-se como objetivo obter o módulo elástico dinâmico longitudinal do concreto a partir de frequências naturais de vibração e a velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal dos corpos de prova.

Para a realização do ensaio foi utilizado o equipamento Sonelastic®, Figura 4, fabricado pela empresa ATCP Engenharia Física. Foi aplicado um pequeno golpe nos corpos de prova, posicionados no pórtico e o som foi captado e foi processado pelo software do equipamento.



Figura 4: Equipamento Sonelastic e realização do ensaio de ressonância acústica.

O ensaio do Módulo de elasticidade tangente inicial foi conduzido de acordo com a ABNT NBR 8522 [25]. Foram aplicados ciclos de carga (carregamento e descarregamento) no corpo de prova posicionado no prato do equipamento Instron EMIC 23-600 conforme mostrado na figura 5. A velocidade de condução do ensaio foi de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s com a realização simultânea das leituras das deformações verticais. O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com os procedimentos recomendados pela ABNT NBR 5739 [26] utilizando-se uma prensa hidráulica Universal EMIC MEU-100 com capacidade de carga de 1000 kN como mostrado na Figura 5.



Figura 5: Ensaio de módulo de elasticidade tangente inicial e resistência à compressão.

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios de resistência à compressão axial juntamente com o desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV) dos resultados.

Tabela 2: Resistência à compressão axial dos concretos.

CONCRETO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)								
	14 DIAS			28 DIAS			56 DIAS		
	$f_{c,14}$	σ	CV (%)	$f_{c,28}$	σ	CV (%)	$f_{c,56}$	σ	CV (%)
C1	23,11	1,16	5,02	26,00	0,70	2,67	29,20	2,16	7,40
C2	30,36	2,76	9,09	35,25	2,41	6,83	41,00	1,45	3,53
C3	30,60	2,88	9,41	35,07	2,62	7,46	41,94	1,08	2,56
C4	41,88	1,16	2,77	42,78	3,07	7,18	49,24	1,13	2,30
C5	46,40	2,16	4,65	47,72	1,21	2,53	51,06	4,57	8,95

O maior valor de resistência obtido foi de 51,06 MPa para o concreto C5 na idade de 56 dias e o menor valor foi de 23,11 MPa para o concreto C1 aos 14 dias. Já o maior valor de CV foi de 9,41 % para o concreto C3 na idade de 14 dias, esses resultados denotam que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%, logo, tem-se uma boa representatividade dos valores de resistência à compressão.

Na Figura 6 são comparados os resultados de resistência à compressão ao longo das idades e para todos os concretos. As barras verticais representam os valores de σ . É possível constatar que todos os concretos apresentaram aumento gradativo nos valores de resistência com a evolução das idades. Observa-se o comportamento inversamente proporcional, representado pela linha cheia, entre a resistência à compressão e a relação a/c, uma vez que quanto menor essa, maior é o valor da resistência obtido.

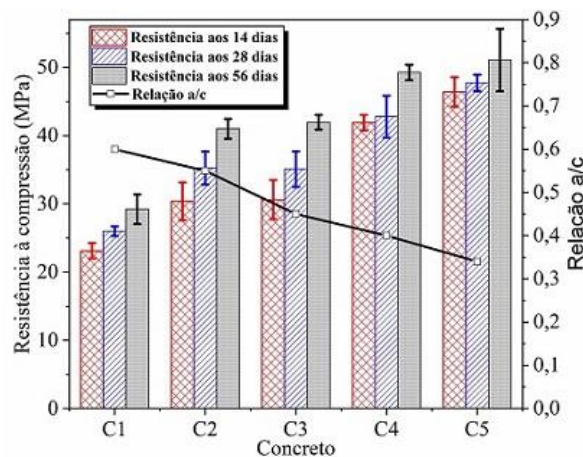


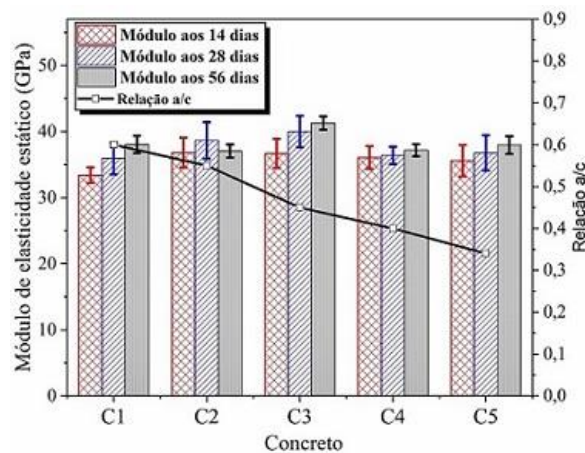
Figura 6: Evolução da resistência à compressão dos corpos de prova ao longo da idade e relação a/c do concreto.

Na Tabela 3 estão indicados os valores médios do módulo de elasticidade. O maior valor foi aquele observado para o concreto C3 com idade de 56 dias (41,29 GPa) e, o menor valor foi de 33,40 GPa para o concreto C1 aos 14 dias. O maior valor de CV foi de 7,26 % para o concreto C5 na idade de 28 dias, denotando que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10% e apresenta, portanto, boa representatividade dos valores obtidos.

Tabela 3: Módulo de elasticidade.

CONCRETO	MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO (GPa)								
	14 DIAS			28 DIAS			56 DIAS		
	$E_{c,14}$	σ	CV (%)	$E_{c,28}$	σ	CV (%)	$E_{c,56}$	σ	CV (%)
C1	33,40	1,18	3,53	35,95	2,40	6,68	38,05	1,32	3,47
C2	36,82	2,26	6,13	38,62	2,77	7,18	37,05	1,00	2,71
C3	36,68	2,19	5,97	39,99	2,40	6,01	41,29	1,00	2,43
C4	36,07	1,73	4,80	36,39	1,14	3,14	37,18	0,93	2,51
C5	35,57	2,40	6,74	36,76	2,67	7,26	37,95	1,32	3,49

Os valores de módulo de elasticidade são comparados por meio da Figura 7. As barras ao centro apresentam o σ . É possível observar que todos os concretos apresentaram aumento nos valores de módulo entre as idades de 14 e 28 dias.


Figura 7: Evolução do módulo de elasticidade dos corpos de prova ao longo da idade.

3.2 Velocidade de Propagação de onda (VPU)

A Tabela 4 apresenta os valores médios de VPU juntamente com o desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados.

Tabela 4: Valores dos ensaios (VPU) dos corpos de prova.

CONCRETO	VELOCIDADE DE ONDA (m/s)								
	14 DIAS			28 DIAS			56 DIAS		
	V_{14}	σ	CV (%)	V_{28}	σ	CV (%)	V_{56}	σ	CV (%)
C1	4562,18	19,38	0,42	4649,96	43,08	0,93	4762,50	40,86	0,86
C2	4729,43	46,78	0,99	4869,71	98,76	2,03	4910,85	34,96	0,71
C3	4765,46	39,51	0,83	4854,64	60,04	1,24	4971,71	25,98	0,52
C4	4801,61	22,54	0,47	4848,36	39,51	0,82	4870,61	48,49	1,00
C5	4802,75	54,11	1,13	4840,68	55,31	1,14	4887,61	44,9	0,92

O maior valor de VPU foi igual a 4971,71 m/s para o concreto C3 na idade de 56 dias e o menor valor foi de 4562,18 m/s para o concreto C1 aos 14 dias. O maior valor do CV foi 2,03% para o concreto C2 na idade de 28 dias, denotando-se que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10% e, portanto, garante boa representatividade dos valores. A Figura 8 apresenta a evolução dos resultados de VPU ao longo das idades, sendo as barras verticais ao centro representando os σ . É observado que todos os concretos apresentam aumento nos valores de VPU com as idades. No entanto, os concretos C4 e C5 apresentaram aumento menor na evolução dos resultados com as idades em relação aos demais concretos. O fato dos menores valores das velocidades observadas nos concretos C4 e C5, aos 56 dias de idade e, em relação aos demais concretos, é possível estar relacionado com a proporção de agregados miúdos e graúdos utilizados na elaboração

dos referidos traços. Tal fato também foi observado na pesquisa de CHUNG e LAW [28], onde concretos com menores proporções de agregados apresentaram menores velocidades de onda. Esse comportamento também foi observado para o Módulo de Elasticidade, evidenciando-se relação direta entre esses parâmetros.

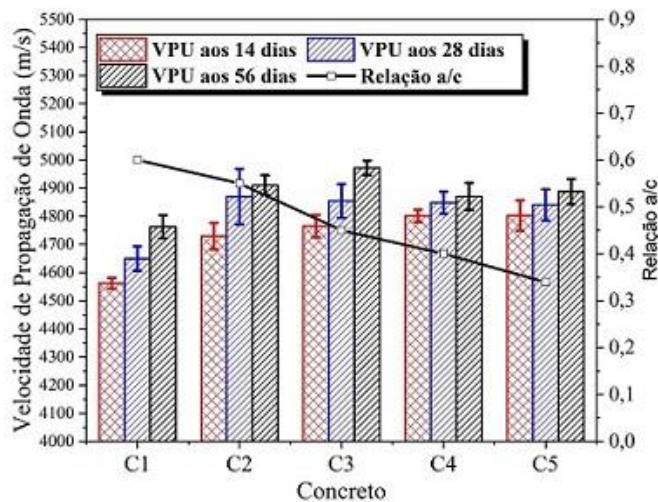


Figura 8: Evolução da velocidade de onda ultrassônica dos corpos de prova ao longo da idade.

3.3 Correlação entre VPU x f_c

Para a realização do estudo de correlação entre VPU e f_c , a partir de todos os tipos de concretos estudados, foi desenvolvido uma análise de regressão não linear simples, comparando-se equações do tipo linear, potência, exponencial e polinomial do 2º grau. A escolha da equação que apresenta melhor representatividade foi realizada por meio do coeficiente de determinação (R^2).

A elaboração de curvas de correlação utilizando-se os traços C1 a C5 de maneira conjunta e não específicas para cada traço, tem como objetivo o estabelecimento de correlação mais confiável e representativa dada a partir de um maior conjunto de dados disponíveis. Ainda, a referida metodologia foi a observada em outras pesquisas, como em [1, 12, 17].

A partir do estudo de regressão a curva correspondente a uma equação polinomial do 2º grau foi a que apresentou maior coeficiente de determinação $R^2 = 0,595$ dentre as equações analisadas. A Figura 9 apresenta a curva de correlação obtida adotando um intervalo de confiança de 95%.

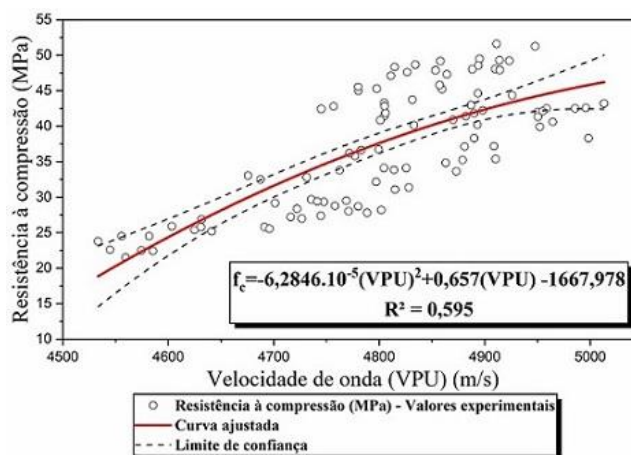


Figura 9: Curva de correlação VPU x f_c

A título de comparação, o valor de R^2 , aqui obtido, é apenas 2,6% maior do que aquele obtido por [17] e aproximadamente 30% inferior ao obtido na pesquisa de [10].

A Figura 10 apresenta uma comparação entre os valores de resistência à compressão experimental com aqueles analíticos previsto pela equação de correlação. É possível verificar que a maioria dos dados está próxima da linha de igualdade $X = Y$.

Os pontos que estão localizados abaixo da linha de igualdade apresentam resultados de resistência analíticos menores do que os valores experimentais. Então para concretos com resistência à compressão no intervalo de 30 a 40 MPa, os valores analíticos foram superestimados em uma variação de 10 MPa e acima de 40 MPa, percebeu-se uma subestimativa para os valores de resistência dentro de uma faixa de variação de 15 MPa. Importante também notar que abaixo de 30 MPa, os resultados previstos analiticamente são mais próximos aos valores obtidos experimentalmente.

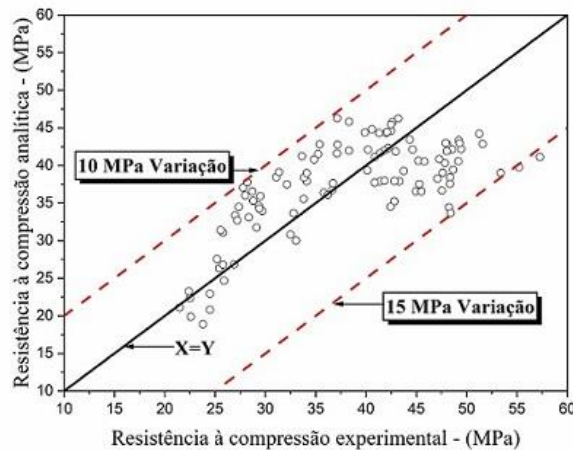


Figura 10: Valores experimentais versus valores analíticos para f_c a partir do ensaio de VPU

3.4 Ensaio de índice esclerométrico (IE)

Os valores médios do IE são apresentados na Tabela 5, juntamente com σ e CV dos resultados. O maior valor de IE foi igual a 41 no concreto C5 com a idade de 28 e 56 dias, e o menor valor obtido foi de 29 no concreto C1 aos 14 dias. Para o CV o maior valor foi de 4,85% para o concreto C3 na idade de 28 dias, reforçando-se boa representatividade nos valores aqui obtidos.

Tabela 5: Valores do IE dos corpos de prova.

CONCRETO	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO								
	14 DIAS			28 DIAS			56 DIAS		
	IE ₁₄	σ	CV (%)	IE ₂₈	σ	CV (%)	IE ₅₆	σ	CV (%)
C1	29	1,25	4,27	30	1,11	3,72	31	0,67	2,18
C2	32	1,47	4,60	33	0,52	1,54	35	0,76	2,16
C3	32	1,47	4,55	33	1,60	4,85	35	1,33	3,83
C4	35	0,84	2,37	38	0,92	2,43	38	0,73	1,94
C5	36	0,62	1,70	41	0,73	1,80	41	1,09	2,66

Na Figura 11 são comparados os valores de IE para cada um dos concretos e sua evolução com as idades. As barras verticais ao centro representam o σ . É possível verificar que todos os concretos apresentaram aumento gradativo nos valores de IE com o avanço da idade. O resultado aqui obtido apresentou comportamento esperado, uma vez, que todos os concretos foram elaborados alterando-se a relação a/c e proporção de material seco. Assim, a leitura da dureza superficial representada pelo valor de IE apresentou aumento gradativo dos resultados, bem como os resultados de resistência à compressão.

No entanto, tal constatação difere-se para as respostas obtidas pelo ensaio VPU, uma vez que, conforme NOGUEIRA e WILLAN [29], a velocidade de propagação de onda está relacionada com parâmetros como o módulo de elasticidade, Poisson e densidade, sendo que tais propriedades não estão relacionadas com a resistência do material. Desse modo verifica-se que a relação a/c influencia diretamente na resistência à compressão do concreto, mas pouco na VPU.

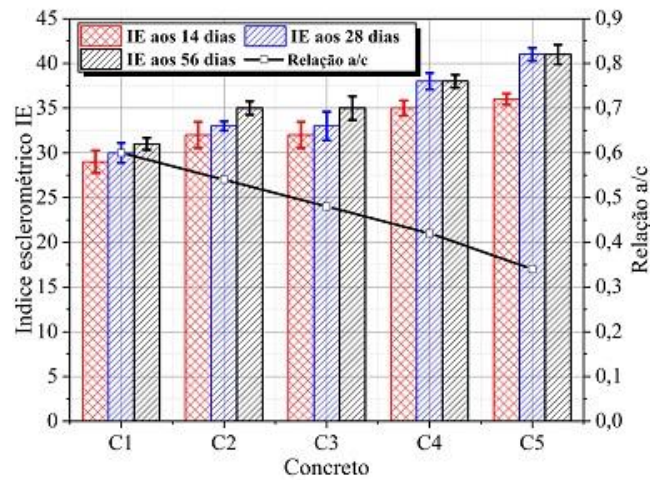


Figura 11: Evolução do IE dos CPs ao longo da idade.

3.5 Curva de correlação IE x f_c

A partir do estudo de regressão, contemplando todos os concretos aqui desenvolvidos, a curva gerada a partir de uma equação exponencial foi a que apresentou maior valor de $R^2 = 0,906$, para a estimativa da resistência à compressão do concreto a partir do IE. O valor obtido denota forte correlação entre os dois parâmetros. A Figura 12 apresenta a curva de correlação para um intervalo de confiança de 95%.

Assim como desenvolvido na correlação VPU x f_c , para a correlação entre o IE, buscou-se a análise de correlação utilizando os traços C1 a C5 de maneira conjunta, sendo o objetivo apresentar a equação que melhor correlaciona a estimativa da resistência à compressão de concretos elaborados na região de Maringá – PR, a partir do IE para concretos que apresentem variação na relação a/c e proporção de material seco.

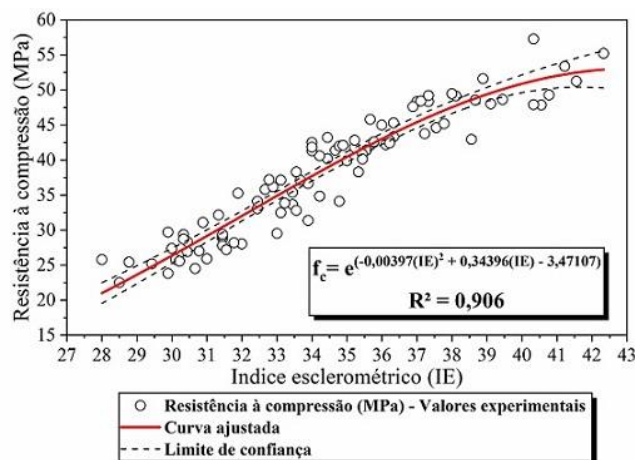


Figura 12: Curva de correlação IE x f_c .

Na Figura 13 apresenta-se uma comparação entre a resistência à compressão experimental com a resistência à compressão estimada analiticamente pela equação exponencial. É possível verificar que a maioria dos dados está muito próxima da linha de igualdade $X = Y$. A razão média entre as resistências, experimentais e analíticas é igual a 0,99.

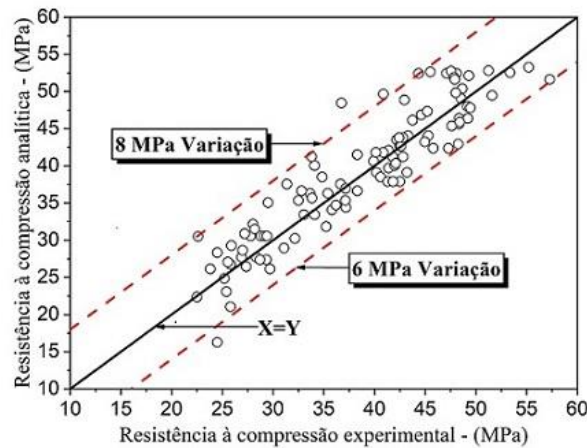


Figura 13: Valores experimentais versus valores analíticos para f_c a partir do ensaio IE.

3.5 Ressonância Acústica (RA)

A Tabela 6 apresenta os resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico (E_d), bem como os valores de σ e CV. O maior valor de E_d foi aquele observado para o concreto C5 com idade de 56 dias (47,08 GPa) e o menor valor foi de 40,53 GPa para o concreto C1 aos 14 dias. Já o maior valor de CV foi de apenas 1,33 % para o concreto C4 na idade de 14 dias, denotando-se boa representatividade dos valores.

Tabela 6: Valores de E_d dos corpos de prova.

CONCRETO	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (GPa)								
	14 DIAS			28 DIAS			56 DIAS		
	$E_{d,14}$	σ	CV (%)	$E_{d,28}$	σ	CV (%)	$E_{d,56}$	σ	CV (%)
C1	40,53	0,77	1,91	41,77	0,53	1,26	43,02	0,51	1,18
C2	43,18	0,48	1,10	44,85	0,36	0,80	45,13	0,66	1,47
C3	44,00	0,53	1,21	45,37	0,59	1,30	46,67	0,84	1,80
C4	44,62	0,59	1,33	45,03	0,35	0,78	46,24	0,55	1,19
C5	45,00	0,55	1,19	45,46	0,55	1,20	47,08	0,77	1,69

Na Figura 14 são apresentados os resultados dos módulos, E_d e E_c ao longo das idades para cada concreto e as barras ao centro apresentam o σ . É possível verificar que todos os concretos apresentaram aumento gradativo nos valores dos módulos a evolução das idades.

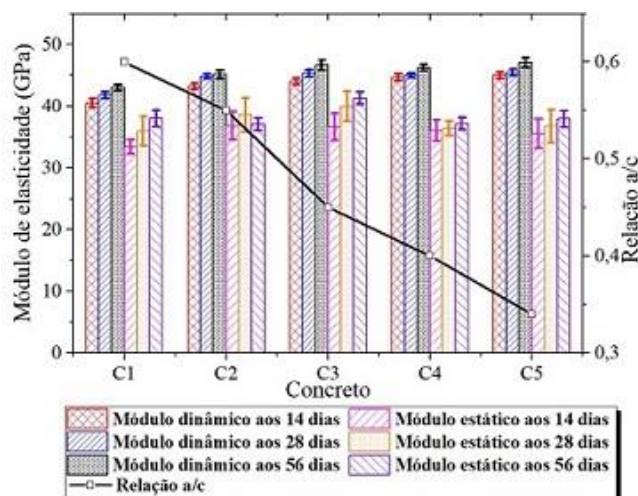


Figura 14: Evolução do módulo de elasticidade dinâmico e estático dos CPs ao longo da idade.

Na Tabela 7 é apresentada a relação entre os valores de (E_d/E_c) para cada idade. O valor mínimo obti-

do para a referida relação foi de 1,13 nos concretos C1 e C3 nas idades de 28 e 56 dias, respectivamente. Os concretos C4 e C5 apresentaram os maiores valores para a relação E_d/E_c , chegando até o valor de 1,27 para o C5 na idade de 14 dias. Assim, os valores da relação ficaram limitados no intervalo de 1,13 a 1,27. Essa constatação é a mesma apresentada na pesquisa realizada por NEVILLE [27]. Logo, para os concretos aqui analisados, observou-se que o valor do E_c equivale a 80% - 90% do valor de E_d obtido por meio de END.

Tabela 7: Relação entre módulos dinâmicos e estáticos (E_d/E_c) dos corpos de prova.

CONCRETO	$E_{d,14}/E_{c,14}$	$E_{d,28}/E_{c,28}$	$E_{d,56}/E_{c,56}$
C1	1,21	1,16	1,13
C2	1,17	1,16	1,22
C3	1,20	1,13	1,13
C4	1,24	1,24	1,24
C5	1,27	1,24	1,24

Observa-se que a relação (E_d/E_c) aumenta de acordo com o aumento da resistência à compressão do concreto. Para menores resistências, observa-se menor diferença entre os valores de módulos e, para maiores resistências, a diferença aumenta. Assim, a estimativa do módulo de elasticidade do concreto a partir do ensaio não-destrutivo deve considerar esse efeito de forma a minimizar o erro.

Para os concretos analisados e com base nos resultados obtidos, a recomendação para a estimativa do módulo estático a partir do módulo dinâmico considerando a resistência à compressão é a que segue:

- Para concretos até 30 MPa: $E_c = 0,845E_d$
- Para concretos entre 30 e 40 MPa: $E_c = 0,868E_d$
- Para concretos entre 40 e 50 MPa: $E_c = 0,814E_d$

3.8 Métodos Combinados

Apresenta-se o estudo de regressão não linear múltipla com o objetivo de indicar a curva que melhor represente as correlações entre os END com vistas a estimativa do parâmetro de resistência à compressão. O modelo de curva que apresentou maior R^2 é representado pela equação $f_c = 0,01486(VPU) + 2,12693(IE) - 106,7884$ com R^2 igual a 0,901. Esse valor de R^2 é praticamente o mesmo obtido por VICENTINI e FERRARI [17] e 13% maior do que aquele encontrado RASHID e WAQAS [10]. O comportamento de f_c em função de VPU e IE através da correlação múltipla, obtida por meio de todos os concretos analisados, é representada por meio de uma superfície de resposta tridimensional conforme Figura 15.

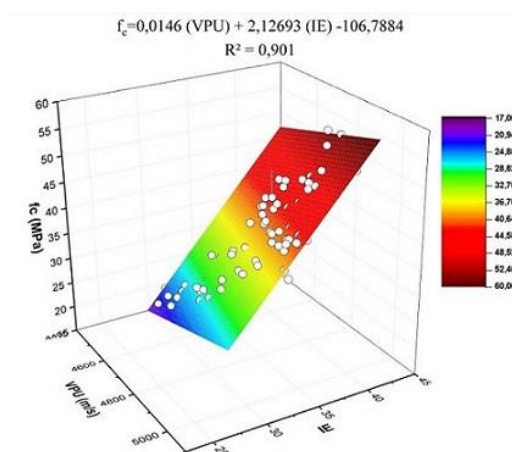


Figura 15: Gráfico do comportamento de f_c em função de VPU e IE

Como o gráfico mostrado na Figura 15 não apresenta facilidade de leitura para sua utilização, são indicadas as curvas de correlação múltiplas na Figura 16, onde é representada a curvas de Iso-resistência conforme metodologia indicada em pela RILEM NTD 43 [15], método conhecido como SonReb. As curvas possibilitam estimar a resistência à compressão de concretos num intervalo de 20 a 50 MPa (produzidos com os

mesmos materiais utilizados na pesquisa). Para a construção das curvas de Iso-resistência os valores adotados estão contidos em um intervalo de 24 a 50 para o ensaio IE e 3600 a 5200 m/s para VPU.

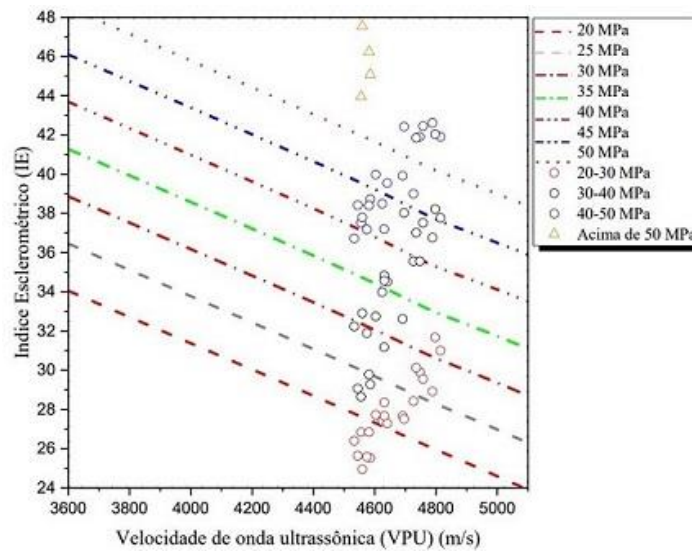


Figura 16: Curvas de Iso-Resistência: Velocidade de onda Ultrassônica x Índice Esclerométrico

A Figura 17 apresenta comparação entre a resistência experimental e aquela obtida analiticamente por meio da equação da correlação múltipla. É possível verificar que a maioria dos pontos encontram-se posicionados muito próximos da linha de igualdade $X = Y$, permitindo-se observar um equilíbrio nos valores acima da linha de igualdade com variação de aproximadamente 5 MPa, valor este menor do que a correlação simples entre IE x f_c .

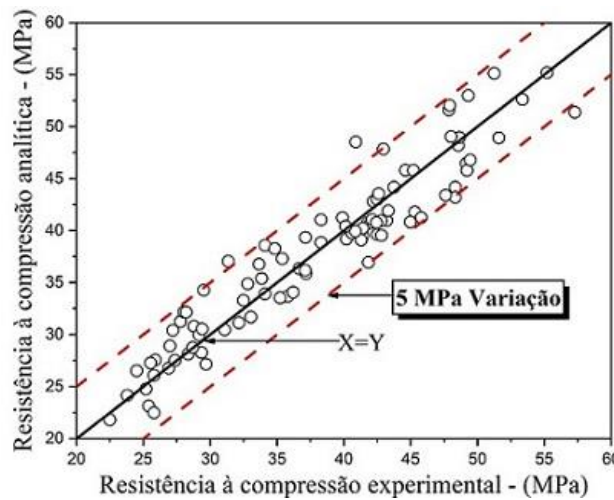


Figura 17: Valores experimentais versus analíticos estimados para a resistência à compressão por meio da correlação múltipla VPU x IE x f_c .

As curvas de correlação, simples e combinada, são aqui agrupadas para verificação da precisão de cada modelo obtido neste trabalho. Para tanto, os resultados de resistência experimentais são confrontados com aqueles analíticos conforme indicado na Figura 18.

A análise da Figura 18 permite observar que, em sua maioria, os resultados analíticos apresentados por cada modelo estão próximos da linha de igualdade e, que, a equação de correlação simples do IE e a equação de combinação múltipla, apresentaram valores muito próximos a linha de igualdade em praticamente toda a faixa de valores de resistência estudados. De maneira geral os valores analíticos superestimados ou subestimados, ficaram em um intervalo de variação de 10%.

Para análise do nível de precisão de cada modelo calculou-se a diferença percentual existente para estimar f_c . É possível observar que a curva de correlação simples elaborada do VPU, foi a que apresentou erros

mais expressivos, sendo em sua maioria maior do que 15%, chegando em algumas resistências a apresentar valores próximos de até 30%. Já as equações elaboradas a partir da combinação simples IE x f_c , e o modelo de combinação múltipla VPU x IE x f_c , apresentaram porcentagem de erro baixos e próximos a 10%.

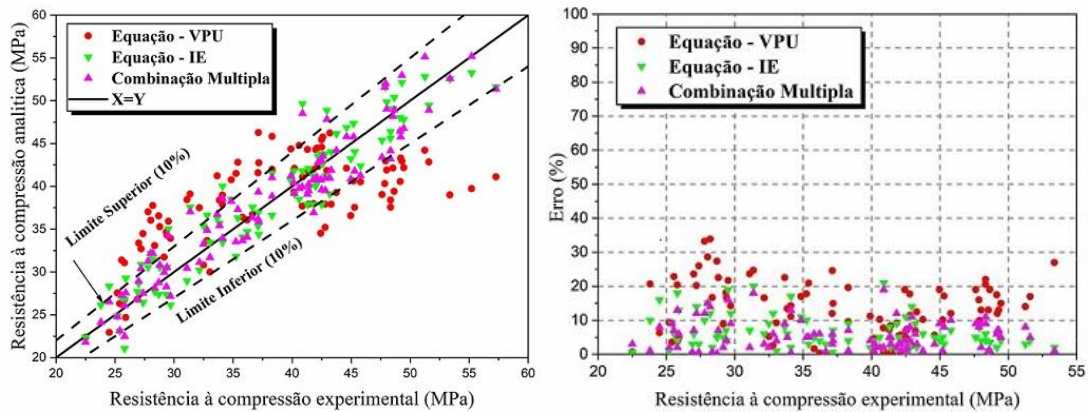


Figura 18: Comparação dos resultados, valores experimentais - analíticos para a resistência à compressão: correlação simples e múltipla e percentual de erro apresentado.

Na Figura 19 é realizada a comparação, por meio de um histograma e uma curva normal, da relação entre a estimativa analítica e experimental ($f_{c-analítico}/f_{c-experimental}$), obtidos por meio das equações de correlação aqui desenvolvidas.

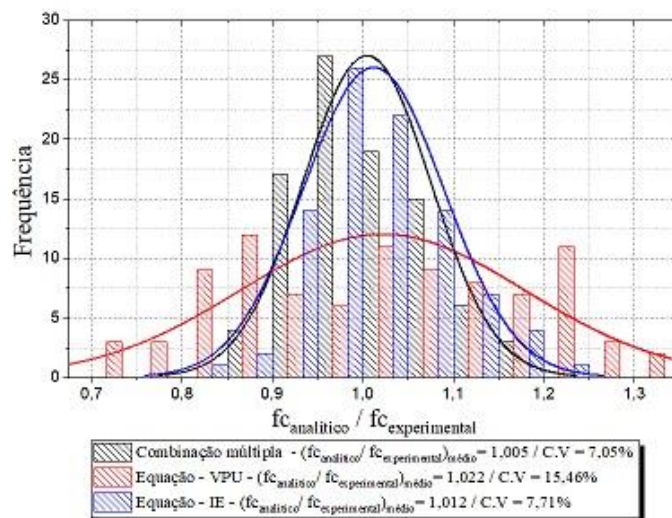


Figura 19: Comparação entre as equações analíticas para estimativa de f_c obtidas na pesquisa.

Por meio da Figura 19, os valores analíticos obtidos pela equação de correlação múltipla apresentaram relação $f_{c-analítico}/f_{c-experimental} = 1,005$, a relação obtida pelas equações de correlação simples envolvendo os ensaios VPU e IE apresentaram uma relação $f_{c-analítico}/f_{c-experimental} = 1,022$ e $1,012$, respectivamente. A equação de correlação múltipla apresentou o menor coeficiente de variação C.V = 7,05%, para as demais equações foram obtidos C.V = 15,46% para equação VPU x f_c e 7,71% para IE x f_c .

4. CONCLUSÕES

A presente pesquisa apresentou a utilização das técnicas não destrutivas de velocidade de propagação de onda ultrassônica, índice esclerométrico e ressonância acústica para a estimativa da resistência à compressão a partir de curvas de correlação geradas a partir de cinco distintos concretos que apresentaram evolução de resistência e módulo ao longo da idade variando entre 25 a 50 MPa. Os ensaios foram realizados nas idades de 14, 28 e 56 dias. A partir programa do experimental desenvolvido e das análises realizadas, foi possível concluir:

A melhor correlação entre VPU x f_c foi obtida por meio da equação polinomial do 2º grau

$f_c = 6,2846 \cdot 10^{-5} (\text{VPU})^2 + 0,657 (\text{VPU}) - 1667,978$, apresentando $R^2 = 0,595$.

A melhor correlação entre IE x f_c foi obtida por meio da equação exponencial $f_c = e^{(-0,00397(\text{IE})^2 + 0,34396(\text{IE}) - 3,47107)}$, apresentando $R^2 = 0,906$.

A estimativa da resistência à compressão do concreto por meio da correlação múltipla de END correlacionando VPU x IE x f_c de acordo com a metodologia SonReb, apresentou valor de $R^2 = 0,901$ a partir da equação $f_c = 0,0146 (\text{VPU}) + 2,12693 (\text{IE}) - 106,7884$.

O estudo entre o módulo dinâmico e estático apresentou a relação entre os parâmetros de módulo de elasticidade, estático e dinâmico bem como a influência da resistência do concreto para a elaboração das equações de correlação.

Os estudos a partir das superfícies tridimensionais de respostas permitiram avaliar o comportamento da curva de correlação múltipla para o parâmetro de resistência à compressão.

No geral a porcentagem de erro apresentada nas equações analíticas permaneceu dentro de 10%, sendo que, a estimativa da resistência à compressão através da correlação múltipla apresentou valores aproximados com erros percentuais menores que a combinação simples.

A elaboração de ábacos de correlação múltipla através de curvas de Iso-resistência auxilia na estimativa da resistência a compressão para concretos elaborados de acordo com o delimitado na pesquisa.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] MACHADO, M.D., SHEHATA, L.C.D., SHEHATA, I.A.E.M. "Correlation curves to Characterize Concretes Used in Rio de Janeiro by Means of Non-destructive Tests". *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 2, n. 2, pp. 100-111, 2009.
- [2] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Detroit, 2017.
- [3] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 228.1R: In-Place Methods to Estimate Concrete Strength. Detroit, 2013.
- [4] TSILOULOU, O., LAMPROPOLULOS, A., PASCHALIS, S. "Combined Non-Destructive testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)." *Construction and Building Materials*, 131, pp. 66-77, 2017.
- [5] ADAMATTI, D.S., LORENZI, A., CHIES, J.A., *et al.* "Análise de estruturas de concreto armado através da velocidade de propagação de pulso ultrassônico: Estudo dos parâmetros tecnológicos intervenientes." *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v.10, n.2, pp. 358-385, 2017.
- [6] BREYSSE, D. "Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods." *Construction and Building Materials*, v. 33, pp. 139-163, 2012.
- [7] PUCINOTTI, R. "Reinforced concrete structure: Non-destructive in situ strength assessment of concrete." *Construction and Building Materials*, v. 75, pp. 331-341, 2015.
- [8] IS 13111 (Part I): Non-Destructive testing of concrete methods of test (Ultrasonic Pulse Velocity), BIS, New Delhi, 1992;
- [9] BRITISH STANDARD. *BS 12504-4: Testing concrete - Determination of ultrasonic pulse velocity*, BSI, UK, 2004;
- [10] RASHID, K., WAQAS, R. "Compressive strength evaluation by non-destructive techniques: An automated approach in construction industry." *Journal of Building Engineering*, v. 12, pp. 147-154, jul. 2017.
- [11] MOHAMMED, B.S., AZMI, N.J., ABDULLAHI, M. "Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests." *Construction and Building Materials*, v. 25, pp. 1388-1397, 2011.
- [12] FAVARATO, L.F., ROSÁRIO, C.V.S., ALZUGUIR, J.P.C., *et al.* "Avaliação teórico-experimental da resistência à compressão de concretos através de ensaios não destrutivos." *Revista Matéria*, v. 24, n. 04, 2019.
- [13] LIM, M.K., CAO, H. "Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness." *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 1310-1315, 2013.
- [14] CONCU, G., NICOLO, B., PANI, L. "Non-destructive testing as a tool in reinforced concrete buildings refurbishments." *Structural Survey*, 29 (2), 2011, 147-161.
- [15] RILEM 43-CND. Combined non-destructive testing of concrete. Draft recommendation for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods. *Materials and Structures*, v.26, p. 43-49, 1993.
- [16] EVANGELISTA, A.C.L. "Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos." Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- [17] VINCENTINI, J.M., FERRARI, V. J. "Esclerometria e velocidade de propagação do pulso ultrassônico para a estimativa da Resistência à Compressão do concreto por meio de curvas de correlação." *Revista Tecnológica*. 29. V. 1, p. 49-61, jan. 2020.

- [18] ASSUNÇÃO, J. W. “Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da região noroeste do Paraná.” Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NM 58: Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica, 1996.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7584: Concreto endurecido: Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 2012.
- [24] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1876: Standard Test Method for dynamic young’s modulus, shear modulus and Poisson’s ratio impulse excitation of vibration. ASTM International, West Conshohocken, 2015.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de Elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [27] NEVILLE, A. M. “Propriedades do Concreto”. Trad. Salvador e Giammusso. 2ª Edição. São Paulo: PINI. 1997.
- [28] CHUNG, H.W., LAW, K.S. “Diagnosing in situ concrete bt ultrasonic pulse technique”. *Concrete International*, v.5, p.42-49, 1983.
- [29] NOGUEIRA, C.L., WILLAN, K.J. “Ultrasonic Testing of Damage in concrete under uniaxial compression”. *ACI Materials Journal*, v.98, p.265-275, 2001.

ORCID

Marcos Vinício de Camargo

<https://orcid.org/0000-0002-3482-9189>

Vladimir José Ferrari

<https://orcid.org/0000-0002-9230-927X>