

---

**ESCLEROMETRIA E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO PULSO  
ULTRASSÔNICO PARA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO  
CONCRETO POR MEIO DE CURVAS DE CORRELAÇÃO**

***REBOUND HAMMER AND ULTRASONIC PULSE VELOCITY TO ESTIMATE  
COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE USING CORRELATION CURVES  
TÍTULO EM INGLÊS***

*Jaqueline Mantovani Vicentini<sup>1</sup>*

*Vladimir José Ferrari<sup>2</sup>*

**Resumo:** Nesse trabalho são abordados dois métodos de END, esclerometria e velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU), com o intuito da obtenção, para os concretos aqui analisados, de curvas de correlação simples e múltiplas entre a resistência do concreto ( $f_c$ ) e as grandezas medidas através dos referidos ensaios, índice esclerométrico (IE) e a VPU, respectivamente. Para tanto, foram moldados corpos de prova cilíndricos (150 x 300 mm) e blocos (300 x 400 x 600 mm) utilizando-se quatro tipos distintos de concretos coletados em diferentes obras da cidade de Maringá durante a fase de concretagem da estrutura. Os resultados obtidos a partir dos ensaios (esclerometria, VPU e compressão axial) realizados nos corpos de prova cilíndricos (CPs) e nos testemunhos de concreto (TCs) foram correlacionados com vistas à obtenção de um modelo matemático para estimar a resistência dos concretos aqui estudados. Foram estabelecidas correlações simples, obtidas a partir de resultados de um único END, bem como correlações múltiplas combinando-se os resultados obtidos com os dois ENDs. Os modelos matemáticos obtidos por meio do estudo aqui desenvolvido, principalmente aqueles provenientes dos ensaios realizados nos TCs, podem ser aplicados para a estimativa da resistência dos concretos analisados, pois apresentam forte correlação e erros que se limitam na faixa de 10%.

**Palavras-chaves:** Concreto. Esclerometria. VPU. Correlação.

**Abstract:** *In this work, two methods of NDT, rebound hammer and ultrasonic pulse velocity (UPV) are addressed, with the aim of obtaining simple and multiple correlation curves between concrete strength ( $f_c$ ) and measured through the said tests, rebound number (R) and VPU, respectively. For that, cylindrical specimens were molded (150 x 300 mm) and blocks (300 x 400 x 600 mm) using four different types of concretes collected in different works of the city of Maringá during the concreting phase of the structure. The results obtained from the tests (rebound hammer, VPU and axial compression) performed on cylindrical specimens (CPs) and on concrete drilled cores (CTs) were correlated in order to obtain a mathematical model to estimate the strength of the concretes studied here. Simple correlations were established, based on results from a single NDT, as well as multiple correlations combining the results obtained with the two NDTs. The mathematical models obtained through the study developed here, especially those from the tests carried out in the CTs, can be applied to estimate the resistance of the analyzed concretes, since they present a strong correlation and errors that are limited in the 10% range.*

**Keywords:** Concrete. Rebound hammer. UPV. Correlation.

---

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Maringá – Brasil, email: [jaqueline\\_vicentini@hotmail.com](mailto:jaqueline_vicentini@hotmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Maringá – Brasil, email: [vladimirjf@hotmail.com](mailto:vladimirjf@hotmail.com)

---

## 1 Introdução

Para o controle de estruturas existentes, segundo a ABNT NBR 7680 (2015), o método de maior confiabilidade é a extração e o rompimento de testemunhos de concreto da estrutura. No entanto, o procedimento por resultar em danos localizados na estrutura, exige a tarefa de recomposição dos locais onde foram efetuadas a extração do corpo de prova de concreto por meio da recuperação da área afetada pelo furo. Segundo EVANGELISTA (2002) ensaios não destrutivos (ENDs) são utilizados para analisar *in situ* algumas propriedades do concreto como homogeneidade, dureza superficial, falhas internas, entre outros, e para a análise da resistência à compressão do concreto por esses métodos, deve-se realizar correlações com outros ensaios ou determinações empíricas. Os ENDs, segundo LESCHINSKY (1991), apresentam vantagens tais como, o dano reduzido da estrutura durante o ensaio, facilidade de execução e rapidez.

A Velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU) e a Esclerometria são os ENDs mais comumente usados para avaliar a resistência do concreto (Breysse, 2012; TSIIOULOU et al., 2017, CASTRO, 2009, FERRARI E PADARATZ, 2003; CASTRO, 1987). Segundo pesquisadores (EVANGELISTA, 2002, BREYSSE, 2012 e MOHAMED et al., 2011), para estimar as propriedades do concreto através dos ENDs deve-se estabelecer curvas de correlações, entre os resultados desses ensaios e a resistência à compressão do concreto, realizados em um mesmo elemento, para verificar se os resultados se relacionam.

Segundo MACHADO et al. (2009), a avaliação das propriedades do concreto das estruturas depende das curvas empregadas para correlacionar as grandezas medidas nos ensaios com as propriedades do concreto que está sendo investigado, conforme descreve a literatura.

Segundo YILDRIM E SENGUL (2011), para os concretos convencionais, existem diversos modelos matemáticos propostos a partir do estabelecimento da correlação do valor do índice esclerométrico (IE) e VPU com a resistência à compressão e módulo de elasticidade.

LIM E CAO (2013) comentam que, nos últimos anos, a combinação de mais de um END para o estabelecimento da correlação com as propriedades do concreto tem sido muito aplicada devido a possibilidade de melhorar a confiabilidade dos resultados e diminuir os erros quando comparado com aqueles resultados provenientes de ensaios utilizando-se apenas um END.

TSIOULOU et al. (2017) também compartilham a idéia de que a combinação dos resultados do IE e VPU pode ser utilizada para a obtenção de modelos mais apropriados com vistas à obtenção da resistência à compressão em concretos convencionais. Essa combinação é mais precisa do que um método que utiliza somente um ensaio individual, pois leva em conta dois parâmetros (IE e VPU) que são influenciados por fatores semelhantes e estão relacionados com a dureza e a densidade do concreto.

O presente estudo foi então desenvolvido tendo-se por objetivo o estabelecimento de curvas de correlação que possibilitem estimar, por meio da utilização de ENDs de esclerometria e VPU, a resistência à compressão de concretos dosados em central, comumente utilizados nas edificações na cidade de Maringá/Pr com resistência na faixa de 20 a 50 MPa. A proposta do estudo também envolve o estabelecimento de curvas de correlação múltipla a partir da combinação dos resultados do IE e VPU com as resistências dos concretos analisados nesta pesquisa.

## 2 Materiais e Métodos

No estudo foram utilizados quatro concretos coletados em três obras em execução na cidade de Maringá/Pr. Os concretos foram dosados em central com diferentes consumos de cimento e mesmos agregados (basalto ½ e 1 e areia natural). Os lotes foram identificados como concreto A, B, C e D, com fck estimado em 25, 30, 35 e 40 MPa, respectivamente.

Por meio da caracterização realizada verificou-se que os agregados graúdos utilizados nas misturas tinham diâmetro máximo de 12,5 mm para a brita ½ e 19 mm para a brita 1, sendo a massa específica igual a 2,73 kg/dm<sup>3</sup> e 2,79 kg/dm<sup>3</sup>, respectivamente. Já a areia natural apresentou massa específica igual a 2,65 kg/dm<sup>3</sup>, massa unitária igual a 1,49 kg/dm<sup>3</sup> e módulo de finura de 1,04 kg/dm<sup>3</sup>, enquanto a areia artificial apresentou os seguintes valores, respectivamente, 2,73 kg/dm<sup>3</sup>, 1,41 kg/dm<sup>3</sup> e 3,80 kg/dm<sup>3</sup>.

Para cada tipo de concreto foram moldados em obra 20 CPs cilíndricos com dimensões de 150 x 300 mm e um bloco com dimensões de 300 x 400 x 600 mm. A coleta de cada amostra de concreto foi realizada de um mesmo caminhão betoneira e retirada durante a fase de concretagem. Por meio do ensaio do abatimento do tronco de cone foram obtidos os valores de 160, 145, 140 e 160 mm para as amostras dos concretos A, B, C e D, respectivamente.

Os CPs cilíndricos foram moldados obedecendo-se as especificações da ABNT NBR 5738 (2015), sendo mantidos no canteiro de obras por 24 horas e, então, conduzidos ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Maringá, onde foram desmoldados e armazenados em câmara úmida, com 95% de umidade, até 48 h antes da realização dos ensaios, conforme indicado na ABNT NBR 7584 (2012). Para a moldagem dos blocos foram utilizadas fôrmas de Madeirit do tipo plastificado, sendo o adensamento realizado mecanicamente com vibrador do tipo agulha. A cura do concreto dos blocos foi dada por saturação da superfície superior do concreto durante 7 dias. Após esse período, os mesmos foram desmoldados e mantidos em ambiente externo ao ar livre procurando-se simular condição semelhante de um elemento estrutural em obra.

Foram extraídos de cada bloco 6 TC com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm para manter a relação igual a 2 conforme prescreve a ABNT NBR 7680 (2015). A extração foi realizada na direção ortogonal a de lançamento do concreto utilizando-se para tanto uma perfuratriz com disco diamantado. O procedimento de extração dos testemunhos foi realizado nas idades de 7, 28 e 91 dias dos concretos, sendo duas extrações por idade para cada concreto.

O ensaio de esclerometria foi realizado em todos os CPs nas idades de 7, 14, 28, 56 e 91 dias e, em todos os TCs nas idades de 7, 28 e 91 dias, antes do ensaio de compressão axial. Nos blocos, procedeu-se com a leitura do IE exatamente no ponto de extração de cada TC nas idades de 7, 28 e 91 dias do concreto. Para a realização do ensaio esclerométrico utilizou-se um equipamento analógico de impacto do tipo Schmidt com energia de percussão de 2,25 N.m.

Os ensaios de esclerometria nos CPs, nos TCs e na superfície dos blocos foram realizados seguindo-se as recomendações da ABNT NBR 7584 (2012). Nos CPs e nos TCs a área ensaiada foi a superfície ao longo da altura do elemento, aplicando-se 9 golpes uniformemente distribuídos em pontos definidos por uma malha quadrada desenhada para tal fim. Para evitar interferência com vibrações, ressonância ou dissipação de energia, os elementos foram posicionados nos pratos da prensa e fixados por meio da aplicação de uma força igual a 15% daquela prevista para a ruptura, para efetuar os impactos do esclerômetro nos elementos.

O ensaio para determinação da VPU foi realizado em todos os CPs cilíndricos nas idades de 7, 14, 28, 56 e 91 dias e em todos os TCs nas idades de 7, 28 e 91 dias. Nos blocos o ensaio foi realizado no mesmo ponto da extração nas idades de 7, 28 e 91 dias do concreto.

Para a realização do referido ensaio foi utilizado o aparelho PunditLab+ da Proceq com transdutores de diâmetro de 50 mm e 54 kHz de frequência. O tipo de transmissão de ondas utilizado foi a direta sendo realizado duas leituras consecutivas para a validação do resultado conforme recomendações da ABNT NBR 8802 (2013).

Por fim, realizou-se o ensaio de resistência à compressão, foi seguida as recomendações da ABNT NBR 5739 (2007), os CPs foram capeados com enxofre enquanto os TCs foram retificados, a prensa hidráulica utilizada foi da linha de Máquinas Universais de Ensaio, com capacidade de 1000 kN, foi aplicado um carregamento contínuo com velocidade uniforme de  $(0,45 \pm 0,15)$  Mpa/s.

### 3 Resultados e discussões

#### 3.1. Resistência à compressão

Na Tabela 1 estão indicados os valores das resistências dos concretos obtidos a partir dos ensaios de compressão axial realizados nos CPs cilíndricos e nos TCs. A resistência indicada em cada idade refere-se ao valor obtido pela média aritmética de 4 CPs e de 2 TCs. Como era esperado, os maiores valores de resistência foram aqueles registrados para o concreto D na idade de 91 dias, tanto para o CP quanto para o TC, sendo de 41,22 e 49,67 MPa, respectivamente. Os menores valores de resistência foram aqueles registrados aos 7 dias de idade, sendo de 24,40 MPa para o CP a partir do concreto B, e de 22,77 MPa para o TC referente ao concreto C. O fato observado denota que a variação do consumo do cimento utilizado na produção desses concretos não influenciou na resistência aos 7 dias de idades entre os concretos.

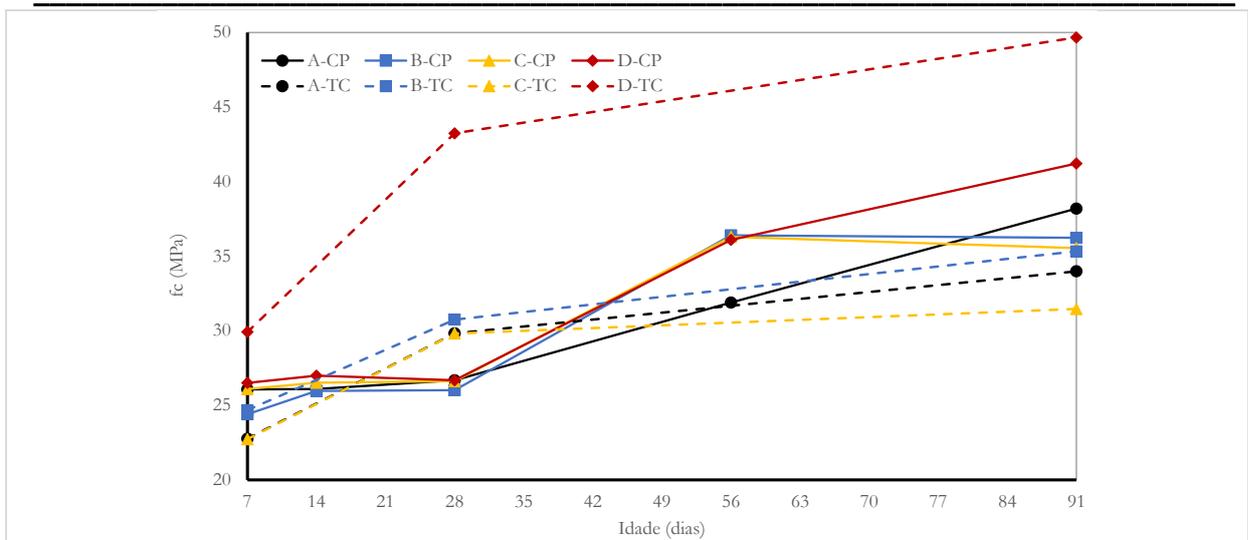
Para comparação entre os resultados de resistência obtidos através dos ensaios realizados nos CPs e TCs foi aplicado o teste de Wilcoxon Pareado que resultou em nível de significância de 48%, indicando-se que não há mudança significativa na resistência à compressão entre os valores indicados pelos CPs e TCs.

Na Figura 1 é indicada a variação da evolução da resistência à compressão de cada concreto com a idade através dos ensaios realizados nos CPs e nos TCs. É possível observar que os resultados dos CPs indicam que não houve evolução significativa na resistência dos concretos nas idades entre 7 e 28 dias. Evolução essa observada apenas para as idades de 56 e 91 dias, com ressalva para os concretos B e C, em que aos 91 dias não se observou aumento na resistência quando comparada com a idade de 56 dias. Para os TCs nota-se maior evolução na resistência dos concretos entre as idades de 7 e 28 dias quando comparado com o comportamento dos TCs.

De forma geral foi observado aumento na resistência de cada concreto com a idade. No entanto, não foram observadas mudanças significativas das resistências entre os concretos, principalmente entre os valores de resistência dos concretos A, B e C.

**Tabela 1** - Resistência dos concretos conforme ensaio de compressão axial

Concretos	Resistência à compressão (MPa)							
	$f_{c,7}$		$f_{c,14}$	$f_{c,28}$		$f_{c,56}$	$f_{c,91}$	
	CP	TC	CP	CP	TC	CP	CP	TC
A	26,07	22,77	26,09	26,68	29,83	31,90	38,19	33,99
B	24,40	24,68	25,97	26,02	30,75	36,40	36,24	35,33
C	26,09	22,73	26,52	26,62	29,82	36,30	35,54	31,46
D	26,49	29,92	26,99	26,69	43,24	36,10	41,22	49,67



**Figura 1.** Evolução da resistência dos concretos com a idade

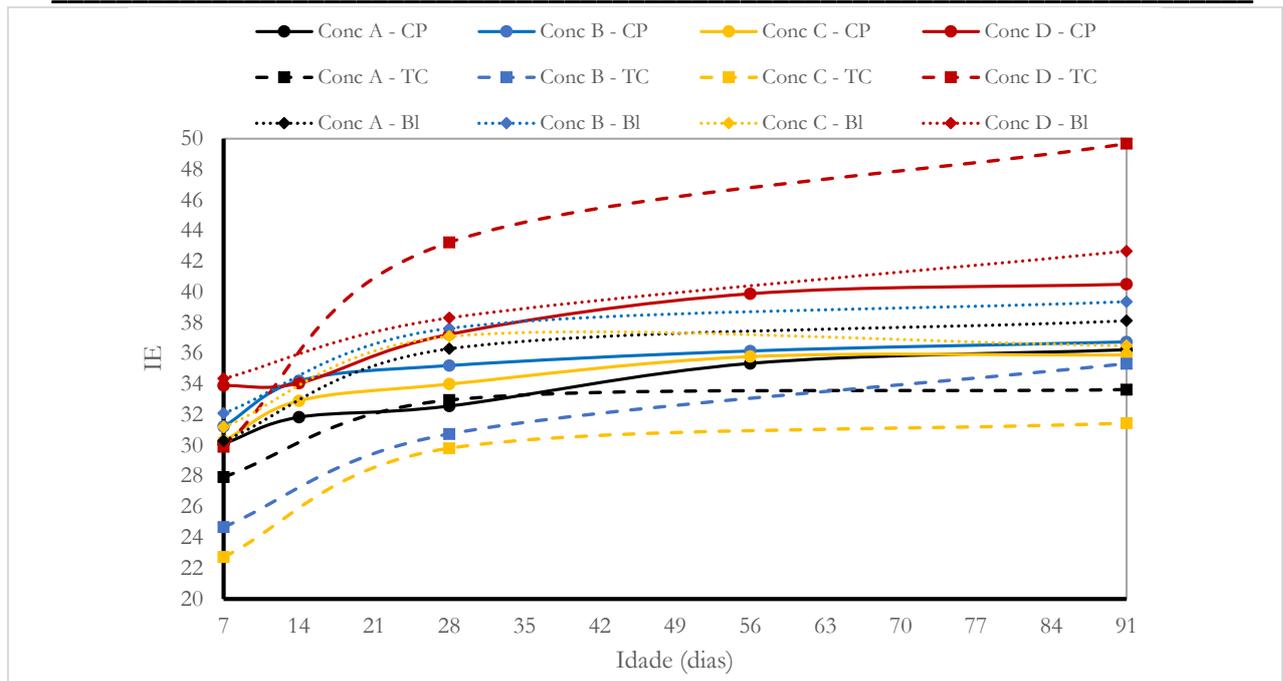
### 3.2. Índice esclerométrico e velocidade de propagação do pulso ultrassônico

Os valores dos índices esclerométricos (IEs) para cada concreto estão apresentados na Tabela 2 de acordo com a idade e o elemento ensaiado. Os valores referem-se a média aritmética dos quatro CPs e dos dois TCs analisados em cada idade. Os valores para cada bloco referem-se à realização de um único ensaio exatamente no local em que se procedeu com a extração do TC. Um estudo estatístico paramétrico utilizando-se o método Anova de medidas repetidas resultou em nível de significância menor que 5%, indicando-se que há diferenças nos valores dos IEs obtidos a partir dos CPs, TCs e blocos.

Na Figura 2 fica evidenciada a evolução crescente do IE com a idade dos concretos a partir dos resultados obtidos nos CPs, TCs e nos blocos. Outro aspecto observado é que em cada concreto os valores obtidos do IE a partir dos ensaios nos blocos apresentam-se mais elevados em relação àqueles obtidos a partir dos CPs e TCs. Exceção apenas para o concreto D, em que os valores do IE obtidos a partir dos ensaios nos TCs foram superiores àqueles obtidos a partir dos blocos e dos CPs. Os maiores valores de IE registrados para os blocos pode estar relacionado com a utilização de superfícies planas na realização do ensaio de esclerometria, resultando em maior precisão quando comparado com os ensaios nos CPs e TCs.

**Tabela 2 -** Valores do IE para os CPs, TCs e blocos

Concretos	Índice Esclerométrico (IE)										
	IE <sub>7</sub>			IE <sub>14</sub>	IE <sub>28</sub>			IE <sub>56</sub>	IE <sub>91</sub>		
	CP	TC	Bloco	CP	CP	TC	Bloco	CP	CP	TC	Bloco
A	30,11	27,94	30,30	31,84	32,57	32,96	36,31	35,35	36,24	33,64	38,13
B	31,23	31,30	32,10	34,21	35,21	35,69	37,63	36,16	36,75	37,04	39,37
C	30,29	28,63	31,20	32,91	34,00	35,36	37,11	35,79	35,90	36,12	36,51
D	33,94	-	34,36	34,06	37,24	39,26	38,32	39,89	40,51	40,40	42,67



**Figura 2.** Evolução do IE com a idade dos concretos

Os valores de VPU para cada concreto estão indicados na Tabela 3, conforme a idade e o elemento ensaiado. Os valores referem-se a média aritmética dos quatro CPs e dos dois TCs analisados em cada uma das idades. Os valores de VPU para o bloco referem-se a média obtida de dois pontos, sendo um em cada ponto onde se procedeu com a extração do testemunho.

Através de um estudo paramétrico, utilizando-se o método Anova de medidas repetidas, foi comparado os resultados de VPU obtido nos CPs, TCs e bloco. Foi atingido um nível de significância de 25,2%, ou seja, maior que o nível de significância de 5% estipulado pelo estudo, sendo assim deve-se reter a hipótese nula, representando-se que não há diferença significativa entre os resultados de VPU obtidos nos ensaios com os CPs, TCs e blocos.

Nos concretos B, C e D, os valores de VPU obtidos no ensaio com os CPs ficaram acima (exceção apenas para 28 dias no concreto D) dos valores obtidos com os TCs e blocos. Já no concreto A essa tendência foi observada apenas aos 7 dias de idade.

Apesar dos valores de VPU terem mostrado um comportamento discrepante, há uma aproximação dos valores de VPU entre elementos (CP, TC e bloco) do mesmo lote de concreto ensaiado. Isso evidencia que nesse estudo o ensaio de VPU sofreu menos influência do que o ensaio esclerométrico conforme o elemento que foi ensaiado.

Os resultados de VPU remetem para uma melhor qualidade do concreto D, como era esperado e, indicam que o concreto A, por conter menor consumo de cimento, apresentou alterações significativas nos valores de VPU com tendência de decréscimo com a idade por razões de maior porosidade e conteúdo de ar incorporado quando comparado com os demais concretos.

**Tabela 3 - Valores de VPU para os CPs, TCs e blocos**

Concreto	Velocidade de onda ultrassônica (m/s)										
	V <sub>7</sub>			V <sub>14</sub>	V <sub>28</sub>			V <sub>56</sub>	V <sub>91</sub>		
	CP	TC	Bloco	CP	CP	TC	Bloco	CP	CP	TC	Bloco
A	4460	4260	4060	3540	4120	4380	4490	4050	3710	3890	3760
B	3940	3790	3840	4500	4480	4390	4310	4500	4560	4410	4020
C	3770	3530	3680	3830	4340	4160	4200	4250	4280	4060	4040
D	4080	3980	3990	4620	4510	4590	4510	4650	4660	4580	4590

### 3.3. Correlação entre IE e resistência à compressão

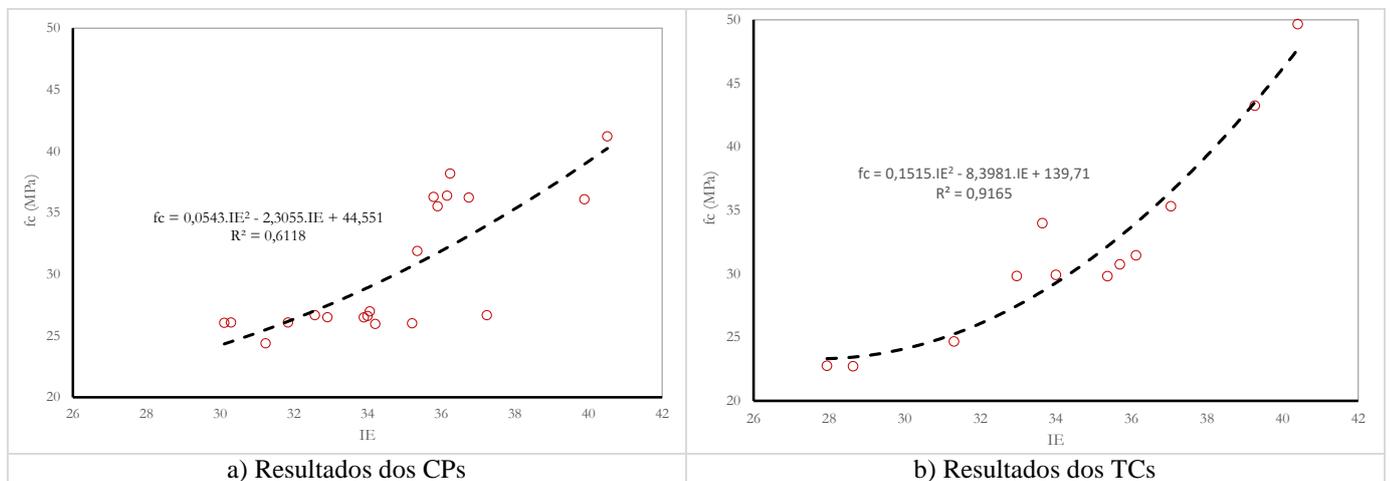
Na Figura 3 tem-se a indicação das curvas de correlação entre o IE e  $f_c$  de todos os concretos com base nos resultados obtidos através dos CPs e TCs. A escolha da equação representativa de cada curva teve como referência o maior valor para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido a partir de um estudo de regressão não linear simples, onde foram analisadas cinco equações de curvas mais comuns propostas na literatura: linear, potência, exponencial, polinômio de segundo grau e logarítmica.

É possível observar uma relação direta entre os valores de resistência e esclerometria. A correlação entre esses parâmetros apresentou-se significativamente melhor quando obtida a partir dos TCs ( $R^2 = 0,92$ ) em comparação com a correlação obtida a partir dos CPs ( $R^2 = 0,61$ ). Em ambos os casos, as equações representativas das curvas foram do tipo polinomial de segundo grau.

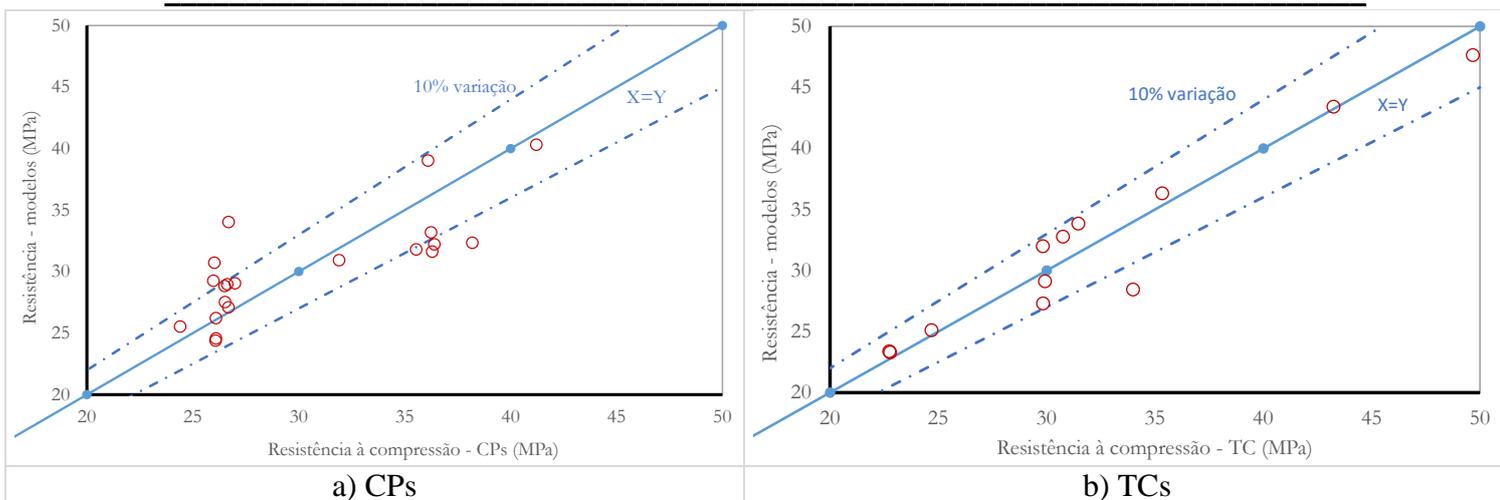
A título de comparação cita-se a pesquisa de Rashid & Waqas (2017), na qual, para nove distintos concretos em razão da relação água/cimento e teor de aditivo, foi obtida na correlação entre a  $f_c$  e o IE uma equação do tipo polinomial com um valor de  $R^2$  igual a 0,65 a partir de ensaios realizados em corpos de prova cúbicos.

Na Figura 4 apresenta-se uma comparação entre os resultados da resistência do concreto obtidas experimentalmente através do ensaio mecânico com aqueles valores de resistência estimados a partir das equações indicadas nas Figuras 6a e 6b.

É observado que a grande maioria dos dados está situada acima da linha de igualdade ( $X=Y$ ), denotando superestimação dos resultados, sendo que para os TCs o erro fica limitado até no máximo 10%.



**Figura 3.** Correlação entre  $f_c$  e IE para os CPs e TCs



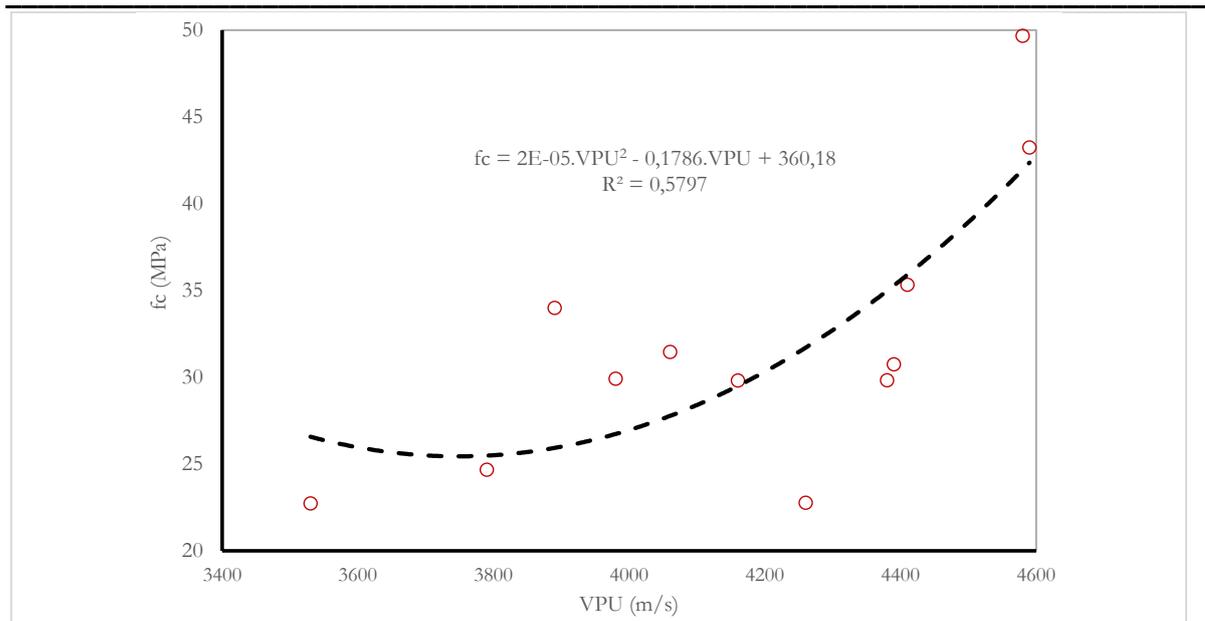
**Figura 4.** Comparação entre resultado experimental e analítico a partir dos valores do IE

### 3.4. Correlação entre VPU e resistência à compressão

Na Figura 5 tem-se a curva de correlação entre a VPU e  $f_c$  de todos os concretos com base nos resultados obtidos através dos TCs. A relação entre VPU e  $f_c$  aqui obtida foi moderada tendo-se grau de determinação de apenas ( $R^2 = 0,58$ ). Já o coeficiente de determinação obtido para a correlação através dos ensaios realizados com os CPs foi muito baixa ( $R^2 = 0,11$ ). O mesmo pode ter ocorrido devido a sensibilidade que o método apresenta, sendo mais facilmente afetado por alterações na composição do concreto, o mesmo também foi observado por PALÁCIOS (2012), ou por falha na execução.

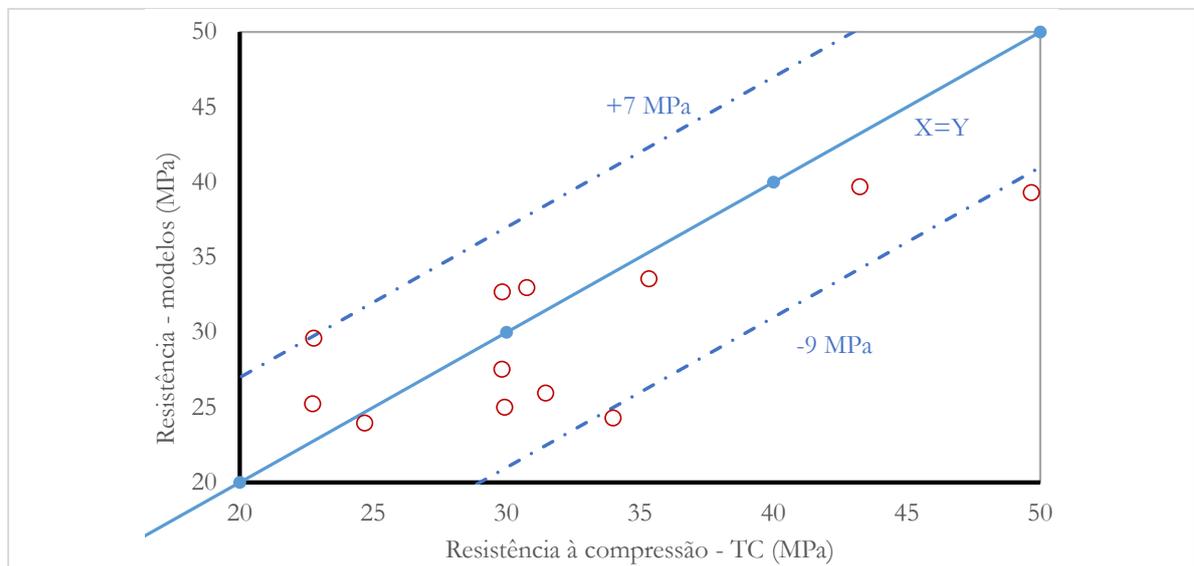
Na pesquisa de RASHID & WAQAS (2017), por meio de uma análise de regressão, foi estabelecida a correlação entre  $f_c$  e a VPU e para uma equação do tipo polinomial foi obtido o valor de ( $R^2=0,79$ ) para um conjunto de dados de nove distintos concretos onde variou-se a relação  $a/c$  e o teor de aditivo. Outros autores, quando da correlação da VPU com a resistência à compressão do concreto, também não chegaram a valores fortes para o coeficiente de determinação, sendo que EVANGELISTA (2002) e MACHADO et al. (2009) obtiveram em suas pesquisas valores de  $R^2$  iguais a 0,69 e 0,64, respectivamente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.



**Figura 5.** Correlação entre  $f_c$  e VPU para os TCs

Na Figura 6 é indicada a uma comparação entre os resultados da resistência do concreto obtidas experimentalmente através do ensaio mecânico com aqueles valores de resistência estimados a partir da polinomial de segundo grau indicada na Figura 5. A maioria dos dados fica perto da linha de igualdade ( $X=Y$ ), em grande parte abaixo dela, apresentando, portanto, valores subestimados ao da resistência dos concretos em estudo.



**Figura 6.** Comparação entre resultado experimental e analítico a partir dos valores da VPU

### 3.5. Combinação dos ENDS - Correlação múltipla

Segundo TSILOULOU et al. (2017), a combinação dos resultados de mais de um tipo de END visa melhorar a aplicabilidade e diminuir os erros em relação àquelas respostas que seriam obtidas a partir da aplicação de um único tipo de END. Aqui, os resultados dos ENDS, VPU e IE, foram combinados para obter um modelo matemático visando-se obter uma melhor correlação com a resistência à compressão do concreto. Para tanto, foi realizado um estudo de

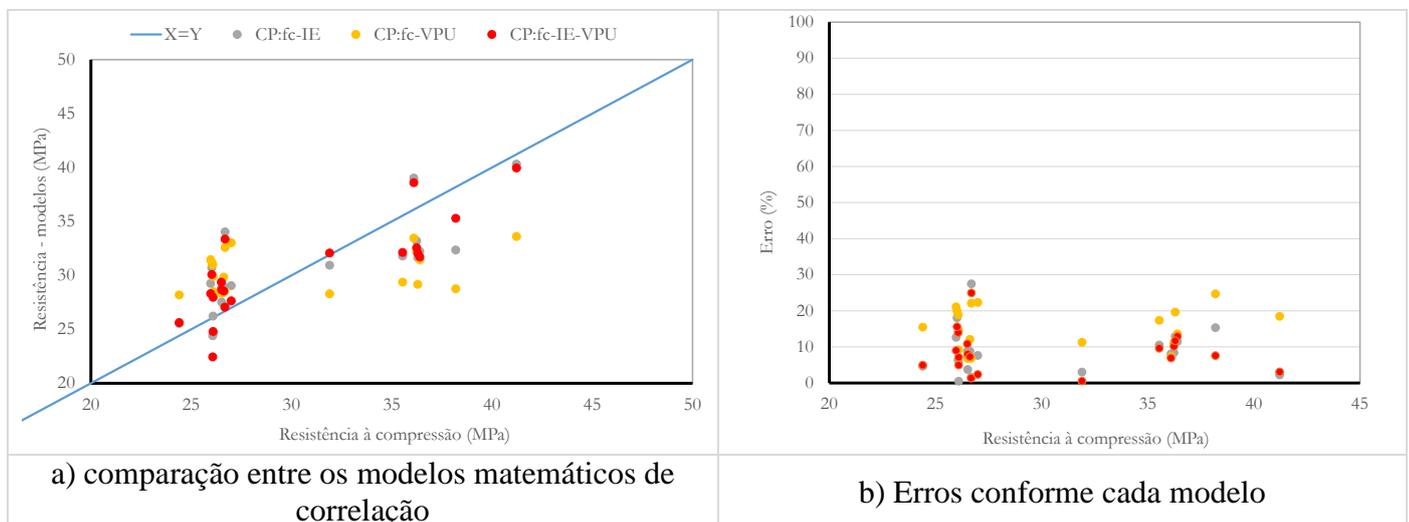
regressão múltipla tendo-se como referência os valores do IE, VPU e  $f_c$  obtidos com os ensaios realizados em todos os concretos (A, B, C e D). Na Tabela 4 é indicado os modelos matemáticos obtidos com os respectivos coeficientes “a”, “b”, “c” e o coeficiente de determinação  $R^2$ . Os modelos 1 e 2 são aqueles obtidos a partir dos resultados dos ensaios realizados nos CPs e TCs, respectivamente.

**Tabela 4 – Modelos matemáticos da correlação múltipla**

Modelos		A	b	c	$R^2$
1	$f_c = e^{(a+b.IE+c.VPU)}$	1,944	0,058	-0,13	0,66
2	$f_c = e^{(a+b.IE+c.VPU)}$	1,228	0,057	0,061	0,89

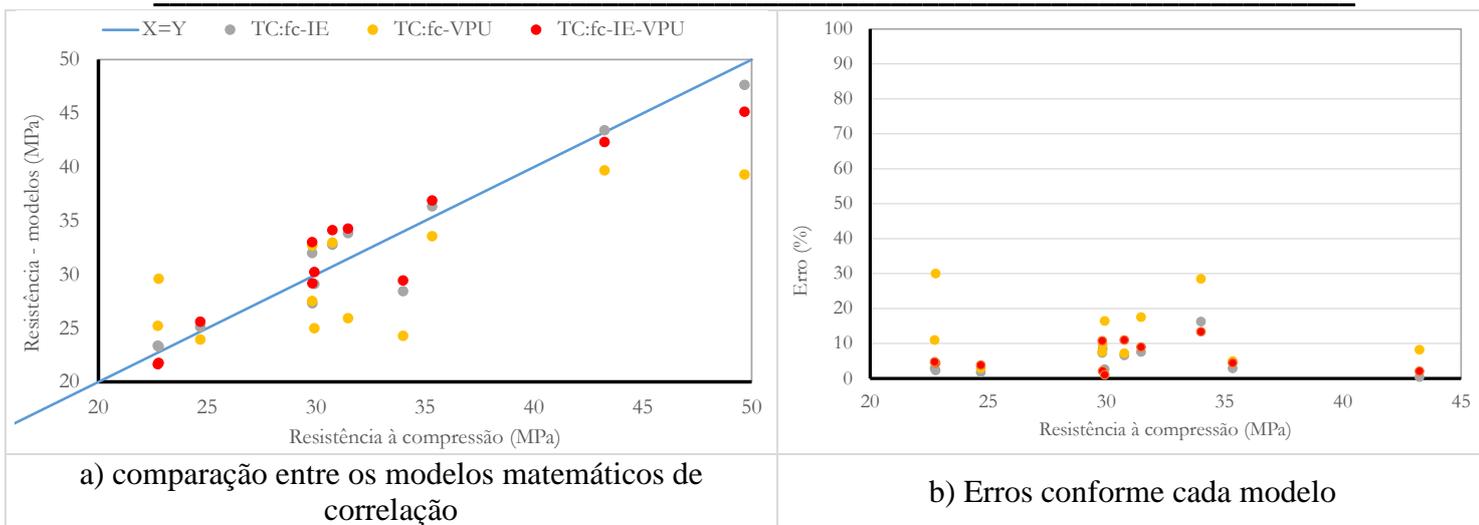
Os resultados obtidos com todos os modelos matemáticos obtidos nesta pesquisa são comparados com aqueles dos ensaios de compressão realizados nos CPs e nos TCs. Na Figura 7-a tem-se os resultados para todos os concretos estudados com base nos CPs. A reta na diagonal é a de referência representando a linha de igualdade ( $X=Y$ ). Os erros estimados a partir de cada modelo matemático são representados na Figura 7-b.

Os resultados indicam que os valores estimados a partir do modelo matemático de correlação múltipla são os que apresentam maior proximidade com a linha de igualdade e consequentemente os menores erros. A maior parte dos resultados obtidos com o referido modelo concentram-se na faixa de 0 a 10% de erro. Essa mesma tendência é seguida pelo modelo matemático obtido a partir dos valores de esclerometria e por último pelo modelo obtido com os valores provenientes do ensaio de VPU.



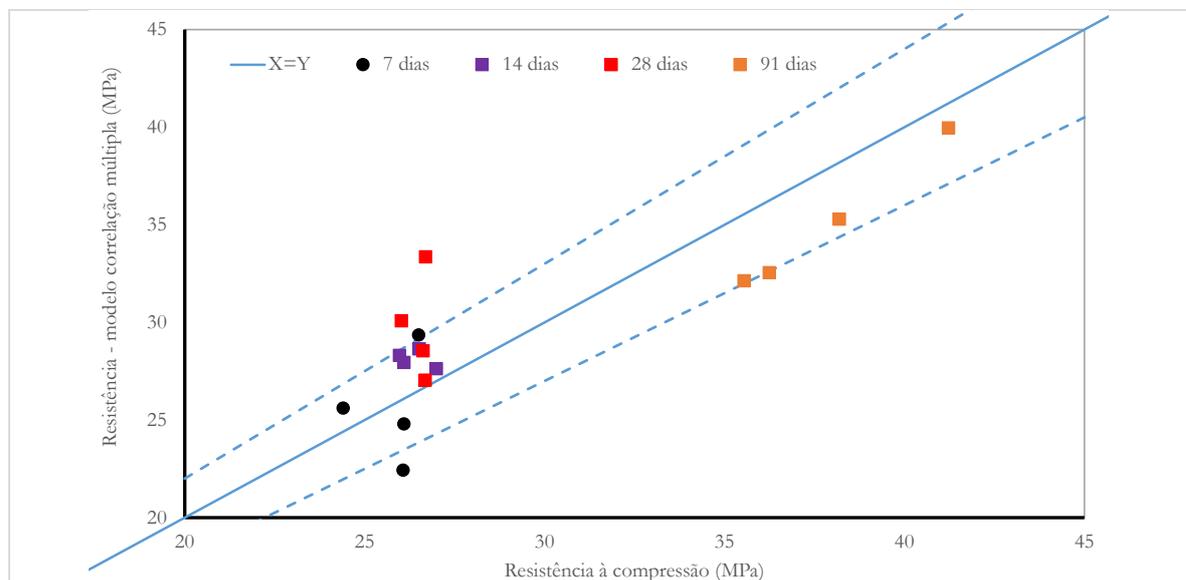
**Figura 7.** Comparação dos modelos de correlação a partir dos ensaios em CPs

Na Figura 8-a tem-se os resultados para todos os concretos estudados com base nos CPs. Os erros estimados a partir de cada modelo matemático são representados na Figura 8-b. Aqui verifica-se que os resultados estimados a partir do modelo matemático de correlação múltipla são os que apresentam maior proximidade com a linha de igualdade e consequentemente os menores valores de erros. Fica evidente que os erros se limitam a 10% quando a resistência é estimada a partir do modelo matemático de correlação múltipla. Boa resposta também é a obtida pelo modelo de correlação simples obtida a partir do IE, onde verifica-se erros limitados a faixa de 10%, com exceção apenas para um dos dados.



**Figura 8.** Comparação dos modelos de correlação a partir dos ensaios em TCs

Na Figura 9 é estabelecida uma comparação entre a resistência à compressão dos concretos obtida através dos ensaios realizados nos CPs e aqueles estimados com base no modelo matemático de correlação múltipla. Os dados são agrupados para cada uma das idades de 7, 14, 28, 56 e 91 dias. As retas tracejadas representam os limites de  $\pm 10\%$ . Pode ser notado que os valores de resistência estimados nas idades de 14 e 91 dias fica contido dentro dos limites do intervalo de  $\pm 10\%$ .



**Figura 9.** Resistência estimada com o modelo de correlação múltipla obtidos para os TCs

#### 4 Conclusões

Nesta pesquisa um programa experimental foi desenvolvido para estabelecer curvas de correlação entre os parâmetros provenientes dos ENDs (IE e VPU) e a resistência à compressão de quatro distintos tipos de concretos. Esses foram coletados diretamente em obra durante a fase de concretagem da estrutura, sendo utilizados os mesmos agregados e variado apenas o consumo de cimento de cada mistura. Foram moldados CPs cilíndricos e blocos de concreto para proceder com a extração de testemunhos de concreto. As correlações, simples e

múltiplas, foram então realizadas tendo-se como referência os dados obtidos através dos ensaios, não-destrutivos e destrutivos, diretamente nos CPs e também nos TCs. A faixa de 20-50 MPa refere-se a resistência à compressão dos concretos analisados neste trabalho. Seguem as conclusões:

- A análise estatística desenvolvida com dos dados de resistência à compressão obtidos a partir dos ensaios de ruptura nos CPs e TCs mostrou não haver diferenças significativas entre esses valores;

- O estudo estatístico paramétrico pelo método Anova de medidas repetidas mostrou que há diferenças não desprezíveis entre os resultados de esclerometria obtidos através dos ensaios realizados nos CPs e TCs;

- Foi observada a existência de uma relação direta entre os valores de resistência e de esclerometria, como era esperado e confirmando o que é indicado na literatura, sendo que a correlação entre esses parâmetros apresentou-se melhor quando obtida a partir dos ensaios nos TCs ( $R^2=0,92$ ) em comparação com a correlação a partir dos CPs ( $R^2=0,61$ );

- A correlação entre VPU e  $f_c$ , obtida neste estudo e para os concretos analisados, não se mostrou forte, tendo-se coeficiente de determinação de apenas  $R^2=0,58$  a partir dos ensaios com os TCs, ficando praticamente na mesma ordem de grandeza do  $R^2$  obtido a partir do ensaio esclerométrico realizado nos CPs. Ademais, a correlação obtida a partir dos resultados com os CPs apresentou valor de  $R^2$  de apenas 0,11. Fato esse associado a possível falha no contato do transdutor com a superfície do elemento a ser ensaiado;

- Nesta pesquisa as correlações simples, utilizando-se resultados de um único END, que apresentaram melhor relação com a resistência dos concretos estudados foram aquelas obtidas a partir dos ensaios realizados nos TCs,

- A pesquisa evidenciou que o modelo matemático obtido a partir da correlação múltipla apresenta menores erros para a estimativa da resistência dos concretos quando comparado com modelos obtidos da correlação simples.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Parte 1: Resistência à compressão axial**. NBR 7680, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. NBR 8802, Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

BREYSSE, D.; Nondestructive evaluation of concrete strength: an historical review and a new perspective by combining NDT methods. **Construction and Building Materials**, 33, 2012, 139-163.

CASTRO, E. **Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2009. 126p.

---

CASTRO, P. F. Ensaios não destrutivos: ensaios e testemunhos e correlação. IN: Reunião anual do Ibracon, 1987. São Paulo. Anais. São Paulo: Ibracon, 1987.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002. 219p.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J. Aplicação de ondas ultra-sônicas na detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado e na avaliação da resistência à compressão. **Acta Scientiarum Technology**. Maringá. Brasil. 2003, v. 25, n. 2, p. 185-191.

LESCHINSCKY, A. Non-destructive methods instead os specimens and cores, quality control of concrete structures, in: International Symposim Held by RILEM, Belgium, 1991.

LIM, M. K.; CAO, H. Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness. **Construction and building materials**, 38, 2013, 1310-1315.

MACHADO. M. D.; SHEHATA. L. C. D.; SHEHATA. I. A. E. M. Correlation curves to characterization concretes used in Rio de Janeiro by means of non-destructive tests. Ibracon structures and materials journal. Volume 2, n. 2, june 2009, p. 100-123.

MOHAMMED, B. S.; AZMI, N. J.; ABDULLAHI, M. Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests. **ConstructionandBuildingsMaterials**, 25, 2011, 1388-1397.

PALÁCIOS, M. P. G. **Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília. Brasília. 2012.

RASHID, K.; WAQAS, R. Compressive strength evaluation by non-destructive techniques: An automated approach in construction industry. **Journal of Building Engineering**, 12, 2017, 147-154.

TSIOULOU, O.; LAMPROPOULOS, A.; PASCHALIS. Combined Non-Destructive Testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of ultra high performance reinforced concrete (UHPRFC). **Construction and buildings materials**, 131, 66-77, 2017.

YILDIRIM, H.; SENGUL, O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. **Construction and building materials**, 25. 2011, 1645-1652.