

Desenvolvimento de modelo para determinação da resistência à compressão axial do concreto a partir de ensaios não destrutivos: ultrassonografia e resistividade elétrica

Development of a model to determine the axial compression resistance of concrete based on non-destructive tests: ultrasonography and electrical resistivity

Francisco Luiz Campos Lopes

francisco.campos.lopes@gmail.com.br

Fernando do Couto Rosa Almeida

fernando@demc.ufmg.br

Laura Viana de Melo

laboratorio@piengenharia.com.br

Arthur Mader Portela Garcia Carvalho

laboratorio@piengenharia.com.br

Resumo

O artigo propôs o desenvolvimento de um modelo para estimar a resistência à compressão axial do concreto utilizando ensaios não destrutivos, como a determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica e resistividade elétrica. Foram utilizados corpos de prova moldados em laboratório com diferentes cimentos, corpos de prova de concreto provenientes de obras e corpos de prova de argamassas estruturais. Os resultados mostram que os ensaios não destrutivos permitem estimativas precisas da resistência à compressão com modelos desenvolvidos a partir de algoritmos de *machine learning*. Os modelos obtidos a partir de algoritmos de *machine learning* possibilitaram a estimativa da resistência à compressão axial em campo e em laboratório com coeficientes de determinação maiores que 0,85 e 0,95 respectivamente.

Palavras-chave: Resistividade elétrica do concreto; Resistência à compressão axial do concreto; Velocidade do pulso ultrassônico no concreto;

Abstract

The article proposed the development of a model to estimate the axial compressive strength of concrete using non-destructive tests, such as determining the ultrasonic wave propagation speed and electrical resistivity. Test specimens molded in the laboratory with different cements, concrete specimens from construction sites and structural mortar specimens were used. The results show that non-destructive tests allow accurate estimates of compressive strength with models developed from machine learning algorithms. The models obtained from machine learning algorithms made it possible to estimate the axial compressive strength in the field and in the laboratory with coefficients of determination greater than 0.85 and 0.95 respectively.

Keywords: Concrete electrical resistivity; Concrete axial compressive strength; Ultrasonic pulse velocity in concrete.

1. Introdução

A resistência à compressão axial do concreto é a propriedade identidade do compósito, regendo a grande parte das outras propriedades e sendo a mais requisitada na construção civil. O concreto usualmente é identificado pela sua classe de resistência, norteando desde o projeto estrutural para concepção de uma estrutura, até a análise estrutural para desenvolvimento de um reforço.

A resistência à compressão axial característica do concreto f_{ck} , normatizada pela ABNT NBR 12655:2015 [1], expressa de modo estatístico a resistência à compressão axial, com um índice de confiabilidade de segurança do valor de 95%, isto é, dado um número n de amostragem, 95% dos valores obtidos para resistência serão maiores que o f_{ck} .

Além dos cálculos estruturais, a resistência do concreto norteia a sua durabilidade, conforme as normas brasileiras, ABNT NBR 12655:2015 [1] e ABNT NBR 6118:2023 [2], onde se tem a resistência à compressão como fator essencial para o projeto de estruturas, dada uma determinada classe de agressividade ambiental. Diversos autores na literatura consideraram a resistência à compressão axial como fator regente em suas equações empíricas ou modelagens matemáticas para se determinar propriedades da durabilidade do concreto.

A resistência à compressão axial do concreto é obtida de diversas formas na construção civil, desde o controle tecnológico realizado com corpos de prova durante as concretagens na fase de concepção, até as extrações e rupturas de testemunhos na fase de reforço e análise estrutural. Quando consideradas estruturas antigas, industriais ou portuárias e de difícil acesso, o método de extração e ruptura se torna difícil, seja pelos custos, prazo, necessidade de escoramento ou impossibilidade de extração, além da mobilização de equipamentos e espaço e necessidade da recomposição ao final.

Diante dessa perspectiva, o presente artigo propõe uma metodologia para obtenção da resistência à compressão do concreto através dos ensaios não destrutivos de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica longitudinal e transversal no concreto e determinação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto.

Foram utilizados corpos de prova moldados em laboratório com o mesmo traço, porém utilizando cimentos de composição química distinta, corpos de prova provenientes de obra com traços desconhecidos e corpos de prova de argamassas estruturais.

2. Metodologia

2.1. Espaço amostral

Considerou-se o espaço amostral para o desenvolvimento do estudo, 3 situações de análises. A primeira situação seria a determinação da resistência à compressão com a variação do tipo de cimento para um mesmo traço, levantando a hipótese que o modelo seria capaz de avaliar a microestrutura do concreto, sendo mais assertivo que modelos matemáticos que não consideram a química do cimento, como a lei de Abrams.

A segunda situação trata de concretos moldados em obra com traço desconhecidos e resistência à compressão axial distinta, ampliando a abrangência do modelo. A terceira e situação trata da utilização de argamassas estruturais com e sem aditivos, utilizadas em uma recuperação estrutural.

Para concepção dos corpos de prova de mesmo traço e cimentos diferentes, considerou se a carta traço para um concreto de classe C25 (Tabela 1). A carta traço foi desenvolvida pela

empresa Consultare-Labcon e o concreto foi rodado nas dependências da Torrent Engenharia em Belo Horizonte-MG. Utilizou-se como aglomerantes os cimentos CP V ARI PLUS 40, CP II E 40 e CP III RS fornecidos pela unidade da CSN em Pedro Leopoldo-MG. Foram consideradas 10 amostras para cada tipo de concreto.

Tabela 1: Valores estimados considerando o traço de concreto adotado para os concretos de mesma resistência e cimentos distintos

<i>Resistência à compressão pretendida aos 28 dias</i>	<i>Resistência à compressão calculada pela curva de Abrams aos 28 dias</i>	<i>Relação água/cimento</i>	<i>Traço em volume</i>	<i>Consumo de cimento</i>	<i>Densidade estimada do concreto</i>
25 MPa	26,95 MPa	0,59	1:1,45:2,05:0,59	349 kg/m ³	2346 kg/m ³

O cimento CP V ARI PLUS apresenta apenas o teor de 0 a 10% de material carbonático, de comportamento filler, como adição (ABNT NBR 16697:2018) [3]. O cimento CP V ARI PLUS é de alta resistência inicial, tendo um maior teor de C3S.

O cimento CP III 40 RS pode um teor de escória granulada de alto-forno entre 35% a 75%, de acordo com o especificado na ABNT NBR 16697:2018 A permeabilidade hidráulica do concreto pode ser reduzida em até 100 vezes com a adição de escória de alto forno [4, 5]. O cimento CP II 40 E por sua vez apresenta 28% de teor de escória de alto forno.

Os corpos de prova moldados em obra de traço desconhecidos e resistência à compressão distintas foram fornecidos pela Consultare-Labcon, sendo 02 amostras para cada uma das resistências de 25, 35 e 45 Mpa.

Os corpos de prova de argamassa estrutural foram fornecidos pela Torrent Engenharia provenientes de uma obra de recuperação em andamento. Os corpos de prova tiveram traços distintos, expressos na Tabela 2, sendo constituídos pelo microconcreto fluido Emckrete 50 da Mc Bauchemie e possuindo ou não a adição do cristalizante Xypex da Mc Bauchemie e do inibidor de corrosão MCI 2005 da Corr Solutions.

Tabela 2: Espaço amostral considerado para os corpos de prova de argamassas estruturais fornecidos

<i>Composição</i>	<i>Tempo de cura</i>	<i>Tipo de cura</i>	<i>Conjunto amostral</i>
Emckrete 50	28 dias	Micro aspersão de água em obra	A
		Imersão em água	B
	64 dias	Micro aspersão de água em obra	C
		Imersão em água	D
Emckrete 50 + Xypex	28 dias	Micro aspersão de água em obra	E
		Imersão em água	F
	64 dias	Micro aspersão de água em obra	G
		Imersão em água	H
Emckrete 50 + Mci 2005	28 dias	Micro aspersão de água em obra	I
		Imersão em água	J
	64 dias	Micro aspersão de água em obra	K
		Imersão em água	L
Emckrete 50 + Xypex + Mci 2005	28 dias	Micro aspersão de água em obra	M
		Imersão em água	N
	64 dias	Micro aspersão de água em obra	O
		Imersão em água	P

2.2. Ensaios realizados

Para a caracterização mecânica foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial das amostras seguindo a ABNT NBR 5739:2018 [6] Os ensaios foram realizados no laboratório da Consultare Labcon em Belo Horizonte-MG.

Os ensaios não destrutivos de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica longitudinal e transversal no concreto (ABNT NBR 8802:2019) [7] e de determinação da resistividade elétrica superficial (UNE 83988-2:2014) [8] e volumétrica (ASTM C1876-19) [9] do concreto foram realizados no laboratório da PI Engenharia em Belo Horizonte-Mg.

Para realização do ensaio de determinação da velocidade do pulso ultrassônico utilizou-se o equipamento Pundit PL-200 da Proceq. Utilizou-se um transdutor de 54Hz para determinação da velocidade da onda P e um transdutor de 40Hz para determinação da velocidade da onda S. As medições foram realizadas de modo direto nos corpos de prova e testemunhos de 10x20cm. As leituras foram realizadas com as amostras em sua umidade natural.

O ensaio de determinação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto foi realizado com o equipamento Resispod da Proceq e com o aparato de medição de resistividade volumétrica (Bulk resistivity) da Proceq, respectivamente. As leituras nas amostras foram realizadas com após 72 horas de saturação por imersão em água.

2.3. Modelos de cálculo

Para obtenção da resistência à compressão estimada dos corpos de prova através dos resultados das velocidades de pulso ultrassônico, utilizou-se a equação proposta pela IS 13311-Parte [10] e pela ASTM C 597:2002 [11], apresentada na equação 01 e 02 respectivamente.

$$\rho = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

Sendo:

V_p = velocidade longitudinal;

V_s = velocidade transversal;

ρ = coeficiente de poisson

$$E_d = 2V_s^2(1 + \rho)\mu_d \quad (2)$$

Sendo:

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico;

μ_d = Densidade do concreto;

A resistência à compressão axial é obtida utilizando a equação proposta no item 8.2.8 da ABNT NBR 6118:2023 [2] considerando concretos de 20 a 30 MPa, expressa na equação 3:

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

Sendo:

α_E = Fator de correção para tipo de agregado utilizado;

Para o modelo de cálculo em realizado em aprendizado de máquina, utilizou-se o algoritmo XGBoost. O XGBoost é um impulsionador de gradiente extremo que combina parâmetros de forte aprendizado com parâmetros de fraco aprendizado, utilizando árvores de regressão. O algoritmo melhora a performance gerenciando a complexidade do modelo de

predição além de reduzir a sobreposição de dados durante o tratamento [11]. O XGBoost se apresenta com a melhor viabilidade para a solução de problemas que envolva regressão [12].

Para o modelo no XGBoost, adotou-se como o espaço amostral a análise dos dados expandidos baseado em sua média e desvio padrão utilizando uma distribuição normal Gaussiana de 500 valores.

Considerou-se para a análise e estudo de importância dos parâmetros os seguintes modelos apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros considerados nos modelos adotados para os cálculos

Modelo	Ultrassonografia Pulso Longitudinal (m/s)	Ultrassonografia Pulso Transversal (m/s)	Resistividade Elétrica Superficial (KΩcm)	Resistividade Elétrica Volumétrica (KΩcm)	Resistência à Compressão (MPa)
EQ	X	X			X
MD1	X	X			X
MD2	X	X	X		X
MD3	X	X	X	X	X

Fonte: Autores.

Os modelos MD1, MD2 e MD3 utilizaram o algoritmo XGBoost, já o modelo EQ utilizou as equações (1), (2) e (3).

3. Resultados e análises

A Tabela 4 apresenta os resultados médios obtidos com os ensaios físicos e não destrutivos realizados. Colocou-se como exemplo para o espaço amostral das argamassas de recuperação o resultado da argamassa A.

Tabela 4: Valores médios dos resultados obtidos para os parâmetros utilizados nos modelos

Amostra	μ UTS.V.P	μ UTS.V.S	μ RVT.SUP	μ RVT.VOL	μ RST
CPV	4323,60	2052,30	38,70	8,20	37,56
CPIII	4649,80	2151,20	318,87	107,20	33,16
CPII	4651,20	2169,20	175,33	56,70	29,50
AFck25	4355,50	2031,50	139,83	48,71	24,30
AFck35	4048,60	1982,00	64,58	19,98	35,95
AFck45	4262,80	2046,90	35,76	10,96	38,80
Argamassa A	4606,27	2268,56	53,60	53,60	80,40

Fonte: Autores.

Onde:

μ UTS.V.P = Velocidade ultrassônica longitudinal média;

μ UTS.V.S = Velocidade ultrassônica longitudinal média;

μ RVT SUP = Resistividade elétrica superficial média;

μ RVT VOL = Resistividade elétrica volumétrica média;

μ RST = Resistência à compressão axial média;

A Tabela 5 por sua vez apresenta os resultados médios obtidos para a resistência à compressão considerando os modelos desenvolvidos e as variações observada entre os resultados da resistência estimada e a real (equação 4).

$$Var = \frac{Valor\ real - Valor\ estimado}{Valor\ real} (\%) \quad (3)$$

Tabela 5: Valores médios obtidos para a resistência à compressão axial estimada

Amostra	μ RST	μ RST EQ	μ RST EQ VAR	μ RST MD1	μ RST MD1 VAR	μ RST MD2	μ RST MD2 VAR	μ RST MD3	μ RST MD3 VAR
CPV	37,56	23,92	36,3%	38,50	-2,5%	37,66	-0,3%	37,30	0,7%
CPIII	33,16	29,27	11,7%	38,20	-15,2%	36,38	-9,7%	32,58	1,7%
CPII	29,50	30,13	-2,1%	31,97	-8,4%	31,26	-6,0%	29,50	0,0%
AFck25	24,30	23,18	4,6%	24,72	-1,7%	24,56	-1,1%	24,22	0,3%
AFck35	35,95	20,43	43,2%	35,88	0,2%	36,01	-0,2%	35,85	0,3%
AFck45	38,80	23,51	39,4%	39,34	-1,4%	38,70	0,3%	38,30	1,3%
Argamassa A	80,40	34,93	56,5%	79,30	1,4%	78,86	1,9%	79,71	0,9%

Fonte: Autores.

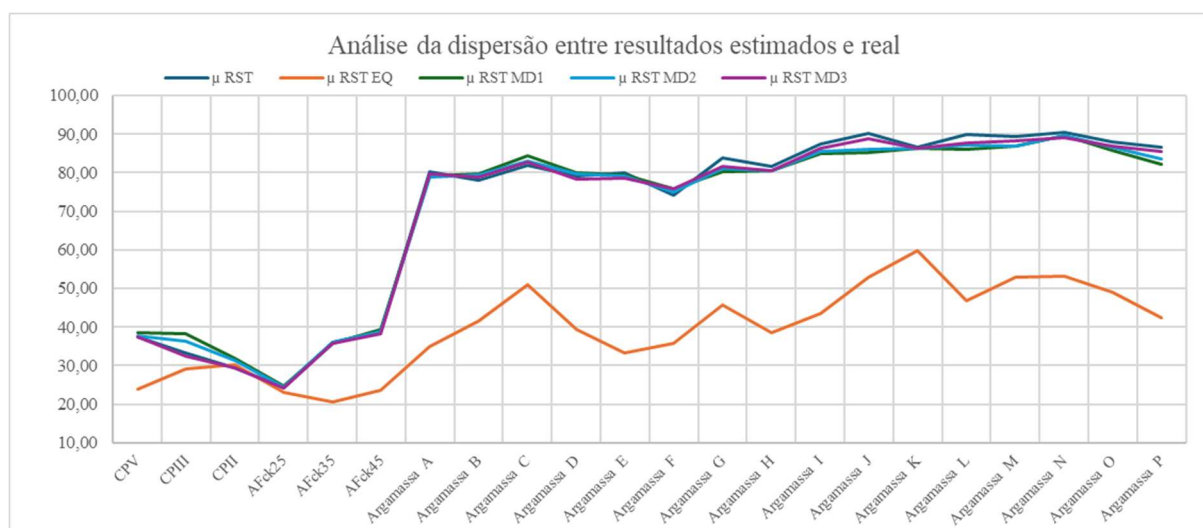


Figura 1: Análise da dispersão entre os modelos desenvolvidos. Fonte: elaborado pelos autores.

Conforme verifica-se na Tabela 5, os resultados médios da resistência à compressão obtido com o modelo equacional apresentaram as taxas de variação mais altas entre os modelos enquanto o modelo de algoritmo que considera todos os parâmetros obteve a menor variação. A Tabela 6 apresenta a análise estatística realizada para os modelos desenvolvidos

Tabela 6: Resultados estatísticos obtidos para os modelos de algoritmo desenvolvidos

Modelo utilizado	Coefficiente de determinação r^2	RMSE	SMAPE
MD1	0,875	8,27	7,01 %
MD2	0,89	8,16	6,97 %
MD3	0,978	3,08	3,61 %

Fonte: Autores.

O modelo MD3 obteve o menor valor para o erro médio percentual absoluto simétrico (SMAPE), o qual mede a diferença percentual entre os valores previstos e reais, levando em consideração a magnitude dos valores. Entretanto o MD3 é inviável em campo por utilizar do resultado da resistividade elétrica volumétrica.

A análise do MD2 confrontada com o MD1 na Tabela 6 permite inferir que o MD2 possui uma menor variância, respondendo melhor ao modelo desenvolvido. Entretanto a análise do erro quadrático médio (RMSE) dos modelos indica, baixa diferença entre os modelos de regressão.

4. Conclusões

A análise realizada apresentou modelos de algoritmos que a partir dos dados de ensaios não destrutivos, fornecem resultados com coeficiente de determinação de até 97%.

O modelo equacional matemático (MD EQ) apresentou uma discrepância entre os valores estimados e reais, apresentando taxas de variação para os resultados maiores que 50%. Já os modelos MD1 e MD2 que são possíveis de realização *in loco* na estrutura apresentaram taxas de variação menores que 20% e 10% respectivamente, apresentando um coeficiente de correlação acima de 0,85.

O modelo MD3 por sua vez apresentou um coeficiente de determinação de 0,97 com taxas de variação menores que 2%, respondendo corretamente à todas as amostras consideradas. O modelo MD3 se apresenta como o melhor modelo para se realizar laboratorialmente em corpos de prova, possibilitando a estimativa da resistência à compressão axial de modo preciso e assertivo.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à PI Engenharia Diagnóstica LTDA, à Torrent Engenharia e à Consultare-Labcon pelo apoio e suporte durante o desenvolvimento do trabalho.

Referências

- [1] Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR 12655:2015 – Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento P. Rio de Janeiro, 2015.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [3] Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos . Rio de Janeiro, 2018.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8802: Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica . Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- [8] Asociación Española De Normalización Y Certificación. UNE 83988-2: durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo: determinación de la resistividad eléctrica: parte 2: método de las cuatro puntas o de Wenner. Genova, 2014a.
- [9] ASTM C1876-19 Standard Test Method For Bulk Electrical Resistivity Or Bulk Conductivity Of Concrete, 2019.
- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 358- 15: Standard method of test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Washington, 10p., 2015.
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete; ASTM C597-02; ASTM:West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- [4] Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR 15575 - Partes 1-6: Desempenho de Edifícios Habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8522: Concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [10] IS 13311-1 (1992): Method of Non-destructive testing of concrete, Part 1: Ultrasonic pulse velocity CED 2: Cement and Concrete.
- [11] Chambers, M.; Dinsmore, T. W. Advanced analytics methodologies: Driving business value with analytics. [S.l.]: Pearson Education, 2014.
- [12] Taffese, W. Z. e Espinosa-Leal, L. A machine learning method for predicting the chloride migration coefficient of concrete. Construction and Building Materials, Vol 348, 2022.