



# **CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS A PARTIR DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM CONCRETOS CONFECCIONADOS COM ADIÇÃO MINERAL DE PÓ DE FERRO**

**Palavras-Chave:** Ensaio direto de ultrassom; Resistência a compressão; Módulo de elasticidade.

**Autores/as:**

**Geovanni Santos Silva - UNICAMP**

**Profa. Dra. Cinthya Bertoldo Pedroso (orientadora) – UNICAMP**

**Dr. Rodrigo Rogerio Cerqueira da Silva (coorientador) - UNICAMP**

---

## **INTRODUÇÃO:**

Na busca por atender as necessidades de suportar e transmitir elevadas cargas e contribuir para a sustentabilidade, adições minerais de resíduos da indústria metalúrgica, descartados ao meio ambiente, tem sido aproveitado pela indústria cimentícia. Além de contribuir com a sustentabilidade, minimiza consideravelmente o consumo de cimento, possibilitando a manutenção ou a melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade do material.

Um dos resíduos pouco pesquisados como adições minerais durante a produção de concreto é o pó de ferro, obtido a partir de processos de fabricação da indústria metalúrgica ou mecânica, podendo ser obtido facilmente em grandes volumes diante das empresas do setor.

Um dos grandes desafios para as técnicas que envolvem traços de concreto com adições naturais está no controle de qualidade após o tratamento, como a homogeneidade da mistura, o tempo de cura e o ganho de resistência ao longo do tempo, consistem em parâmetros de difícil avaliação, gerando dúvidas quando comparadas aos valores determinados em projeto, que geralmente são obtidos em laboratório. Sendo assim, alguns autores propõem o uso da velocidade de propagação de ondas de ultrassom, na inferência da qualidade do concreto através de parâmetros de resistência e rigidez e propriedades físicas como absorção de água.

Tendo em vista o que foi apresentado, o objetivo da pesquisa foi avaliar o comportamento de concretos produzidos com adição de pó de ferro em comparação ao concreto convencional, correlacionando suas propriedades mecânicas e físicas com os parâmetros de propagação de ondas obtidos pelo ensaio de ultrassom.

## **METODOLOGIA:**

Para a pesquisa foram confeccionados 6 corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento conforme o traço em massa (1:2:2,45), fator a/c de 0,6 e diferentes

teores de pó de ferro (0%, 10%, 20% e 30%), em relação a massa de cimento, os quais foram ensaiados em cada uma das seguintes idades 7, 14 e 28 dias, totalizando 72 amostras. Após a produção do concreto realizou-se ensaios de Slump test (ABNT-NM 67, 1998). Os corpos de prova foram ensaiados, primeiramente, por ultrassom (USLAB, Agricef, Brasil - ABNT-NBR 8802, 2019 – Figura 1a) aos 7, 14 e 28 dias, pelo método direto, para a determinação da velocidade e, logo após, foram ensaiados à compressão (Figura 1b) para determinação da resistência ( $f_c$  - ABNT-NBR 5739, 2018) e do módulo de elasticidade ( $E_{ci}$  - ABNT-NBR 8522, 2017). Após 28 dias, foram determinadas a massa e as dimensões de cada corpo de prova para cálculo da densidade. A partir da velocidade direta e da densidade do concreto ( $\rho$ ) foi determinado o coeficiente de rigidez ( $C_{LL} = \rho \cdot V^2$ ).

As amostras foram submetidas aos 28 dias, ao ensaio de absorção por imersão, conforme especificações da ABNT-NBR 9778 (2005).

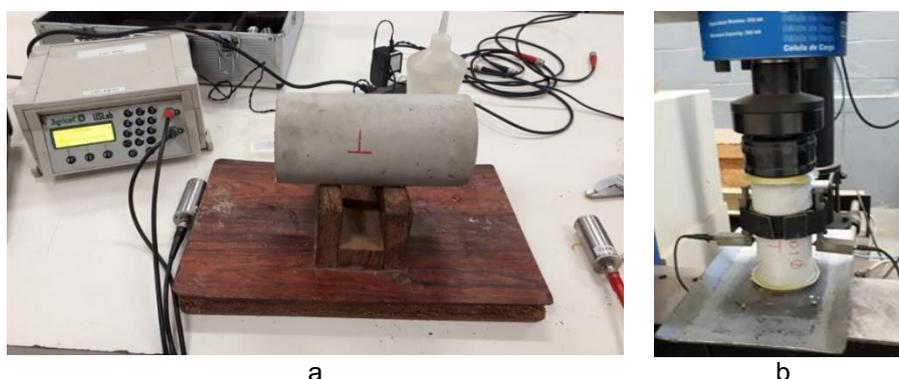


Figura 1. Ensaio de ultrassom nos corpos de prova com equipamento USLAB (Agricef, Brasil) (a) e ensaio de compressão instrumentada do corpo de prova de concreto (b).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Apesar das diferentes porcentagens de adição de pó de ferro, os valores das densidades estão dentro dos limites para concreto entre  $2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a  $2800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (ABNT-NBR 9778, 2015 – Tabela 1). A adição mineral de pó de ferro, alterou a trabalhabilidade do concreto em 3 cm, para todas as idades, se considerarmos o material sem adição mineral e com adição de 50%, conforme apresentado pelo ensaio *Slump Test* (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de *Slump Test* e de densidade para os traços produzidos com diferentes adições de pó de ferro.

Idade (Dias)	Amostra	Slump Test (mm)	Densidade ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
7	0%	190	2318
	10%	200	2335
	25%	200	2345
	50%	220	2459
14	0%	190	2378
	10%	200	2388
	25%	200	2371
	50%	220	2460
28	0%	190	2330

10%	200	2365
25%	200	2374
50%	220	2422

Para os parâmetros obtidos por meio dos ensaios, houve um acréscimo, considerando as adições de 10, 25 e 50%, em relação ao traço sem adição de pó de ferro, em (6, 11 e 26%) para a resistência, (8, 21, e 38%) para o módulo de elasticidade, (4, 6 e 13%) para coeficiente de rigidez e (2, 4 e 6%) para velocidade direta de ultrassom (Figura 2).

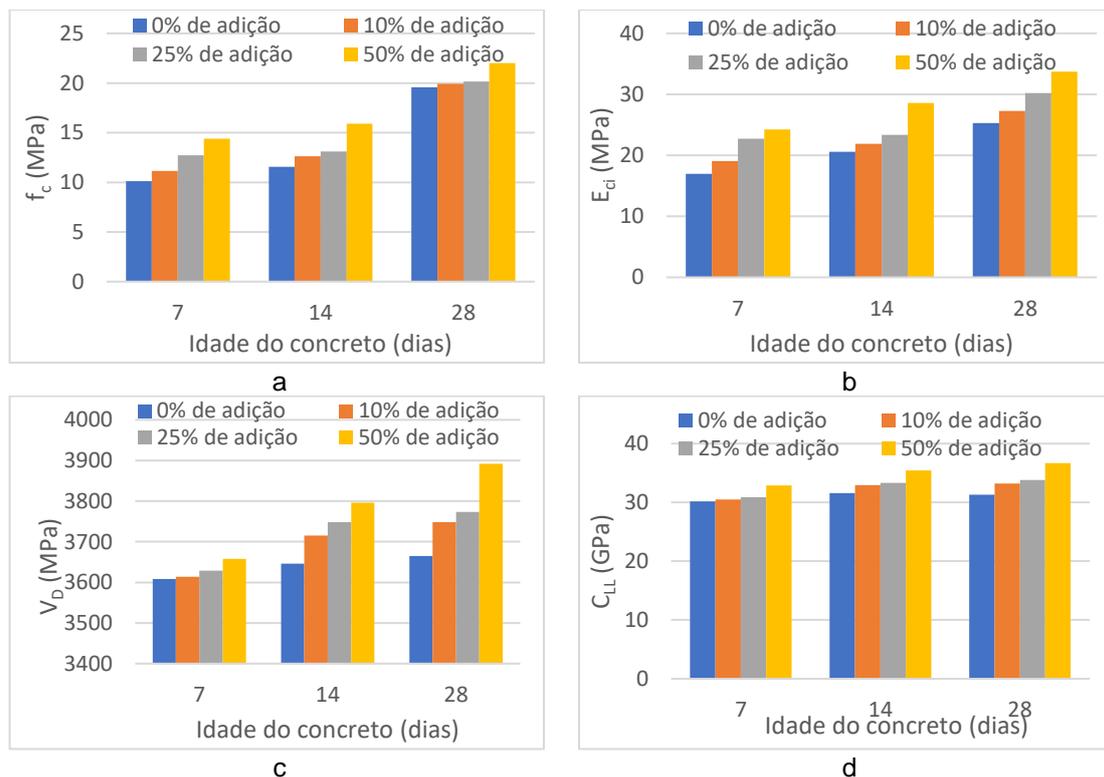


Figura 2. Variações das propriedades mecânicas ( $f_c$  e  $E_{ci}$ ) e das propriedades acústicas ( $V_D$  e  $C_{LL}$ ) em função da idade do concreto e das concentrações das adições de pó de ferro na matriz cimentícia.

Os modelos gerados entre os parâmetros não destrutivos ( $V_D$  e  $C_{LL}$ ) e os destrutivos ( $f_c$  e  $E_{ci}$ ), foram todos estatisticamente significativos ( $P$ -valor $<0,05$ ) sendo que as melhores correlações foram obtidas para a previsão da rigidez ( $E_{ci}$ ) (Figura 3).

Os modelos obtidos entre resistência à compressão ( $f_c$ ) e velocidade direta ( $V_D$ ) apresentam coeficiente de determinação ( $R^2$ ) estão dentro dos encontrados na literatura com aditivos minerais de cinzas volantes, zeólita natural e escória de alto-forno, variando entre 90 a 96% (Hamid et al., 2012 – Figura 2). Os modelos obtidos por Yildirim e Sengul (2011) para correlacionar o módulo de elasticidade em compressão estática ( $E_{ci}$ ) com a velocidade de propagação direta ( $V_D$ ), apresentaram valores de ( $R^2$ ) entre 80 a 96%. Correlações dos parâmetros de rigidez e resistência obtidos em ensaio de compressão com os coeficientes de rigidez ( $C_{LL}$ ) obtidos por ensaio direto de ultrassom, foi encontrado na literatura Silva (2020), com modelos lineares, com valores de ( $R^2$ ) na faixa de 85% a 97% para ( $E_{ci}$ ) e 79% a 95% para ( $f_c$ ).

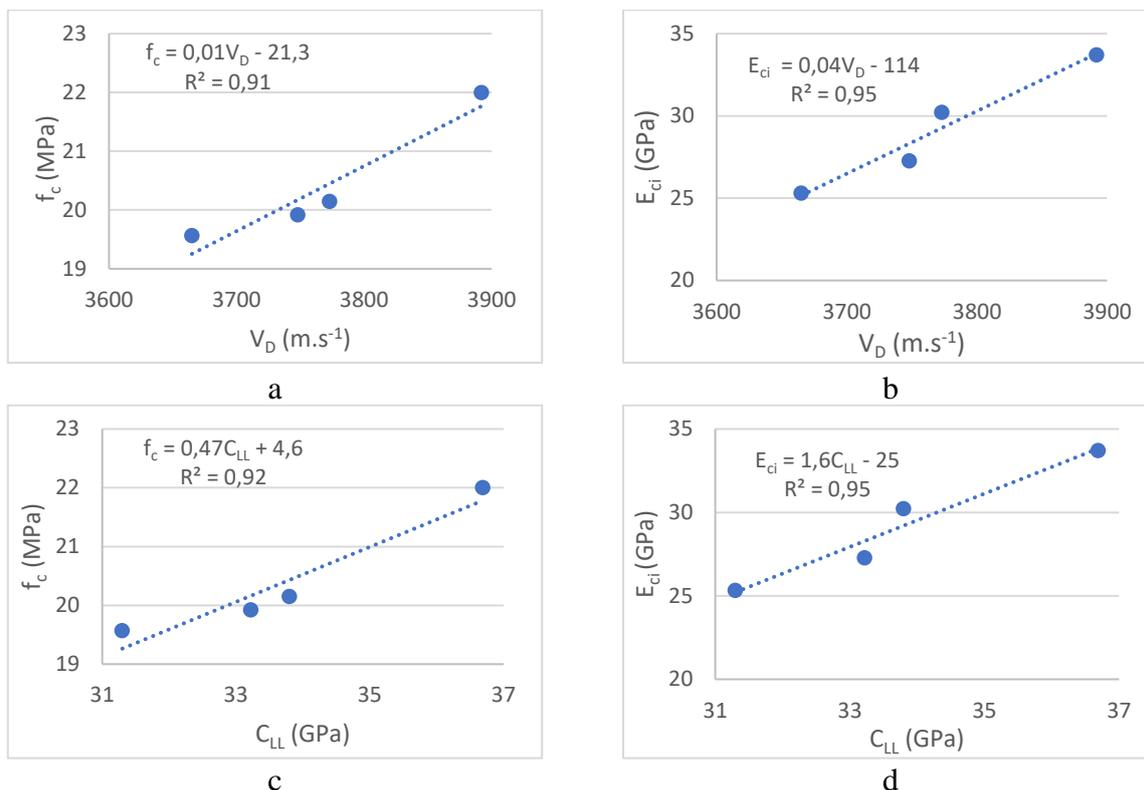


Figura 3. Modelos de regressão entre os parâmetros destrutivos ( $f_c$  e  $E_{ci}$ ) e os não destrutivos ( $V_D$  e  $C_{LL}$ ) para a idade do concreto de 28 dias.

A absorção de água está diretamente relacionada com a porosidade formada, concreto que possui maior absorção de água, resulta em estruturas com maior índice de vazios maiores consequência da sua baixa massa específica. Considera-se, assim, que as adições minerais colaboram para o preenchimento dos poros do concreto, devido ao diâmetro das partículas, melhorando as propriedades do concreto vinculadas à sua durabilidade e aumento de sua massa específica. (SANTOS, 2019). Através da análise variância pelo método ANOVA, o modelo obtido com  $R^2$  de 96% possui P-Valor (0,020) menor que 0,05, demonstrando existir uma relação estatisticamente significativa entre os parâmetros obtidos pelo ensaio de absorção e velocidade de ultrassom, indicando nível de confiança de 95,0% (Figura 4).

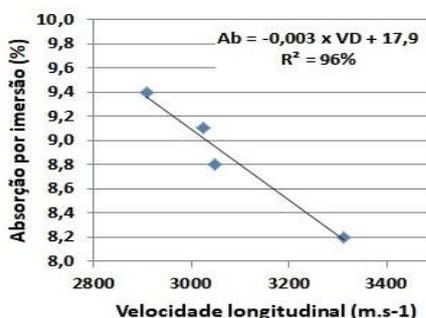


Figura 4. Modelo de regressão entre absorção por imersão e velocidade longitudinal.

Os resultados obtidos indicam que o aumento das adições de pó de ferro, diminuiram a porosidade e o teor de água dentro das amostras de concreto, aumentando a propagação de ondas de ultrassom. Adições minerais influenciam no tamanho dos poros e na sua distribuição e

consequentemente na resistência do concreto. Os modelos obtidos podem ser utilizados como solução de ensaio não destrutivo para estimar absorção de água de amostras e estruturas de concreto, desde que estejam dentro da faixa dos valores encontrado pelos ensaios de absorção, e possua o mesmo teor de adição de pó de ferro abordado na pesquisa nos traços de concreto.

## CONCLUSÕES:

A adição mineral de pó de ferro, mesmo em pequenas concentrações em relação ao traço de concreto, contribui para o aumento das propriedades mecânicas ( $f_c$  e  $E_{ci}$ ), e das propriedades acústicas ( $V_D$  e  $C_{LL}$ ). As correlações entre os parâmetros mecânicos e acústicos foram estaticamente significativas com elevados coeficiente de determinação ( $R^2$  superiores a 93%). Tendo em vista os resultados da pesquisa, o ensaio de ultrassom se mostrou uma técnica expedita para avaliação das características do concreto, capaz de distinguir traços com precisão e confiabilidade em concretos com diferentes teores de adições minerais.

A adição mineral de pó de ferro reduziu a absorção de água nas amostras de concreto, fato ocasionado pela redução da porosidade do material e o consequente aumento das propriedades mecânicas.

## BIBLIOGRAFIA:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR NM 67. **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. NBR 5739. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. NBR 8522. **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. NBR 8802. **Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019.

HAMID, R.; YUSOF, K. M.; ZAIN, M. F. M. **Ultrasonic Testing of HPC with Mineral Admixtures**. In: **Nondestructive Testing Methods and New Applications**. Malaysia IntechOpen, 2012. p. 221-234.

HEEDE, V.; BEILE, N. **A service life based global warming potential for high-volume fly ash concrete exposed to carbonation**. Construction and Building Materials – v.55, p. 183 - 193, March, 2014.

SANTOS, R. **Propriedades físico-mecânicas e colorimétricas do concreto pigmentado com óxido de ferro vermelho e preto**: haahahah. 2019. 10 f. Monografia (Especialização) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (Ipt), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

SILVA, R. R. C. da. **Propagação de ondas de ultrassom em sistemas de contenção par obras de terra**. Tese de Doutorado. UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas. p.113. 2020.

YILDIRIM, H.; SENGUL, O. **Modulus of elasticity of substandard and normal concretes**. Construction and Building Materials, v. 25, n. 4, p. 1645-1652, 2011.