

Correlação das propriedades mecânicas e físicas por meio da propagação de ondas de ultrassom em concretos produzidos com adição mineral de pó de ferro

RODRIGO ROGERIO CERQUEIRA DA SILVA - Dr. - <https://orcid.org/0000-0002-7928-9462> (rodrigorogerioudotorado@gmail.com);
CINTHYA BERTOLDO - Drª. - <https://orcid.org/0000-0001-9039-4805> (cinthyab@unicamp.br) | UEC

RESUMO

VISANDO ATENDER ÀS NECESSIDADES DA SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL, O USO DE ADIÇÕES MINERAIS DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA METALÚRGICA, ANTES DESCARTADOS NO MEIO AMBIENTE, TEM SIDO APROVEITADO PELA INDÚSTRIA CIMENTÍCIA. A PRESENTE PESQUISA TEM COMO OBJETIVO AVALIAR A RESISTÊNCIA, ELASTICIDADE E POROSIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADIÇÃO DE PÓ DE FERRO EM COMPARAÇÃO AO CONCRETO CONVENCIONAL, CORRELACIONANDO SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS COM OS PARÂMETROS OBTIDOS PELO ENSAIO DE ULTRASSOM. OS RESULTADOS APRESENTARAM MELHORIAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICA E ACÚSTICAS, PARA OS TRAÇOS DE CONCRETO COM ADIÇÃO MINERAL DE PÓ DE FERRO EM TEORES DE 25 E 50%. AS ANÁLISES ESTATÍSTICAS APRESENTARAM MODELOS DE CORREÇÃO COM (R^2) SUPERIORES A 91%, INDICANDO QUE O ENSAIO DE ULTRASSOM, PELO MÉTODO DIRETO, PODE SER UTILIZADO NO CONTROLE DE QUALIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO, QUE FAZEM O USO DE ADIÇÕES MINERAIS EM TRAÇOS DE CONCRETO VISANDO

MELHORAR SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÁSTICAS.

PALAVRAS-CHAVE: ENSAIO DE ULTRASSOM, ADIÇÃO MINERAL, COEFICIENTE DE RIGIDEZ, RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, MÓDULO DE ELASTICIDADE.

1. INTRODUÇÃO

Na busca por atender às necessidades de suportar e transmitir elevadas cargas estáticas e dinâmicas e, ao mesmo tempo, atender à necessidade de novas alternativas para a sustentabilidade e de reaproveitamento de materiais em benefício do meio ambiente das grandes obras de infraestrutura, as adições minerais oriundas de resíduos de processos das indústrias metalúrgica ou mecânica têm sido utilizadas pela indústria cimentícia. No intuito de diminuir os impactos causados pela indústria cimentícia ao meio ambiente, estão sendo testadas e analisadas adições minerais que possam vir a ser incorporadas ao concreto sem

alterar a sua quantidade de finos e sem comprometer significativamente suas propriedades reológicas, além de diminuir o custo nos traços de concreto, por meio da diminuição do consumo de cimento (MORAES, 2001; DINIZ *et al.* 2018).

Geralmente as adições minerais são oriundas de resíduos de processos industriais, muitas vezes descartados no meio ambiente, sendo então aproveitados pela indústria cimentícia. Um dos resíduos pouco pesquisados como adição mineral 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, das empresas do setor.

Um dos grandes desafios para os estudos de dosagem e usos de concretos com adições minerais está no controle de qualidade da homogeneidade da mistura, do tempo de cura e do ganho de resistência ao longo do tempo. São parâmetros de difícil avaliação, gerando dúvidas

TABELA 1

TRAÇOS UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

% adições pó de ferro	Traço	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Pó de ferro (Kg)	Relação a/c	Slump (mm)
0	1:2:2,5	10,0	20,0	25,0	0	0,6	190
10%	1:2:2,5:0,1	10,0	20,0	25,0	1,0	0,6	200
25%	1:2:2,5:0,25	10,0	20,0	25,0	2,5	0,6	200
50%	1:2:2,5:0,50	10,0	20,0	25,0	5,0	0,6	220

FONTE: AUTORES (2023)

quando comparados aos valores determinados em projeto, que geralmente são obtidos em laboratório.

Alguns autores propõem o uso da velocidade de propagação de ondas de ultrassom, na inferência da qualidade do concreto por meio de parâmetros de resistência e rigidez (Demirboğa *et al.*, 2004; Ulucan *et al.*, 2008; Uysal, *et al.*, 2011) e propriedades físicas como absorção de água (Hamid *et al.*, 2010; Bouchhima *et al.*, 2013 e Amâncio *et al.*, 2019), para concretos produzidos com diferentes tipos e dosagens de aditivos minerais. Segundo os autores supracitados, a técnica de avaliação das estruturas por meio da utilização de propagação de ondas ultrassônicas se destaca pela praticidade, portabilidade e facilidade no manuseio, além de não causar danos às estruturas. Assim, o uso de ensaios não destrutivos como o ultrassom tem sido empregado nas últimas décadas para a obtenção de modelos de correlação entre as velocidades de propagação das ondas de ultrassom, com propriedades mecânicas e físicas do concreto, obtidas por meio de ensaios destrutivos (ANDRADE e FIGUEIREDO, 2014; RODRIGUES e FIGUEIREDO, 2003).

Tendo em vista o que foi apresentado, foram realizados ensaios de medição de velocidade do pulso ultrassônico em concretos com diferentes porcentagens de adições minerais de pó de ferro, a fim de avaliar se o ensaio é capaz de verificar as diferenças entre os traços, e obter modelos de correlação entre as propriedades mecânicas e físicas com os parâmetros de propagação de ondas obtidos pelo ensaio de ultrassom.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais e métodos

Como amostragem para a pesquisa, foram confeccionados 72 corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura de concreto (ABNT-NBR 5738, 2015), conforme o traço em massa (1:2,2:4,5), com consumo de cimento de 380 Kg/m³ e fator a/c de 0,6. A amostragem foi composta por 7 repetições considerando as idades de ensaio de 7, 14 e 28 dias com as seguintes



FIGURA 1

ADIÇÃO MINERAL DE PÓ DE FERRO

FONTE: AUTORES (2023)

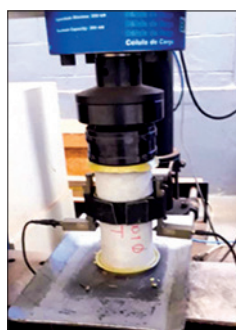
características: sem adição e com adição de pó de ferro com teores 10%, 25% e 50% em função da massa de cimento (Tabela 1), considerando a mesma relação a/c (água/cimento). As porcentagens de adições minerais foram utilizadas em relação à massa de cimento, não havendo o objetivo de diminuição da massa de cimento diante da utilização das adições. A Tabela (1) mostra os traços utilizados na preparação das amostras.

O pó de ferro acrescentado ao concreto foi obtido por meio do processo de usinagem e corte de aço CA-50 (Figura 1). A caracterização do pó de ferro e dos agregados miúdos e grãos, foi realiza-

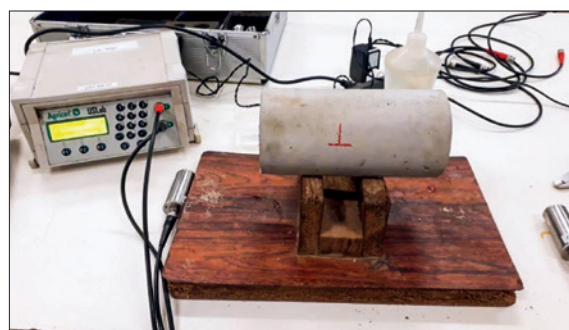
da segundo as recomendações das normas para agregado miúdo (ABNT-NBR 17054, 2022; ABNT-NBR 16916, 2021; ABNT-NBR 16972, 2021; ABNT-NBR 16917, 2021; ABNT-NBR 16972, 2021).

2.2 Ensaios realizados

Logo após a produção do concreto para cada tipo de traço, realizou-se ensaios de *slump test* (ABNT-NBR 16889, 2020). Os corpos de prova moldados foram ensaiados aos 7, 14 e 28 dias para determinação da resistência à compressão (f_c) – (ABNT-NBR 5739, 2018) e módulo de elasticidade (E_c) – (ABNT-NBR 8522,



A



B

FIGURA 2

(A) ENSAIO DE COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE EM CORPO DE PROVA DE CONCRETO INSTRUMENTADOS COM EXTENSÔMETROS; (B) ENSAIO DE ULTRASSOM EM CORPOS DE PROVA COM EQUIPAMENTO MODELO USLAB AGRICEF, BRASIL

FONTE: AUTORES (2023)

TABELA 2

RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS, GRAÚDOS E PÓ DE FERRO

Agregado	Massa específica (kg/m³)	Massa unitária (kg/m³)	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura
Brita	2650	1500	25	6,75
Pó de ferro	2960	2530	1,2	1,72
Areia	2590	1310	4,8	1,89

FONTE: AUTORES (2023)

2017) conforme Figura 2(a), em máquina universal de ensaios (EMIC), com célula de carga de 15.000 toneladas, com capacidade máxima de 100 MPa, com taxa de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

Anteriormente à realização dos ensaios destrutivos, os corpos de prova cilíndricos foram ensaiados nas diferentes idades (7, 14 e 28 dias) pelo método de propagação de ondas, ensaio direto, utilizando equipamento de ultrassom (USLAB, Agricef, Brasil –

ABNT-NBR 8802, 2019 – Figura 2b) e transdutores de faces planas de 45 kHz. Os ensaios de ultrassom foram realizados posicionando os transdutores em faces opostas do corpo de prova (Figura 2b). A partir do comprimento do corpo de prova (L) e do resultado do tempo de propagação das ondas (T), foram calculadas as velocidades de propagação das ondas de ultrassom (V) conforme a norma ABNT-NBR 8802 (2019). A massa e as dimensões de cada corpo de prova

TABELA 3

VALORES DE ADIÇÕES DE PÓ DE FERRO E DENSIDADE DOS CONCRETOS PARA OS TRAÇOS PRODUZIDOS COM DIFERENTES ADIÇÕES DE PÓ DE FERRO

Idade (dias)	Adição de pó de ferro (%)	Densidade (kg/m³)
7	0%	2318
	10%	2335
	25%	2345
	50%	2459
14	0%	2378
	10%	2388
	25%	2371
	50%	2460
28	0%	2330
	10%	2365
	25%	2374
	50%	2422

FONTE: AUTORES (2023)

foram determinadas em todas as idades para o posterior cálculo da densidade (ρ). De posse da velocidade direta e da densidade do concreto (ρ), foi determinado o coeficiente de rigidez ($CLL = \rho \cdot V^2$) de cada amostra.

As amostras também foram submetidas, na idade de 28 dias, ao ensaio de absorção por imersão, conforme especificações da ABNT-NBR 9778 (2005). Em seguida, foi realizado o ensaio de ultrassom seguindo as especificações da norma ABNT-NBR 8802 (2019), para avaliar correlações entre as propriedades física e acústica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela (2) mostra os resultados da caracterização dos agregados (grauído, miúdo e pó de ferro) utilizados na elaboração dos traços de concreto.

Apesar das diferentes porcentagens de adição de pó de ferro, os valores das densidades dos concretos mostrados na Tabela (3), ficaram dentro dos limites para concreto, entre 2000 kg/m^3 a 2800 kg/m^3 (ABNT-NBR 9778, 2015). A adição mineral de pó de ferro alterou os valores do Slump Test, aumentando o abatimento em 30 mm, considerando o traço de concreto sem adição mineral e com adição

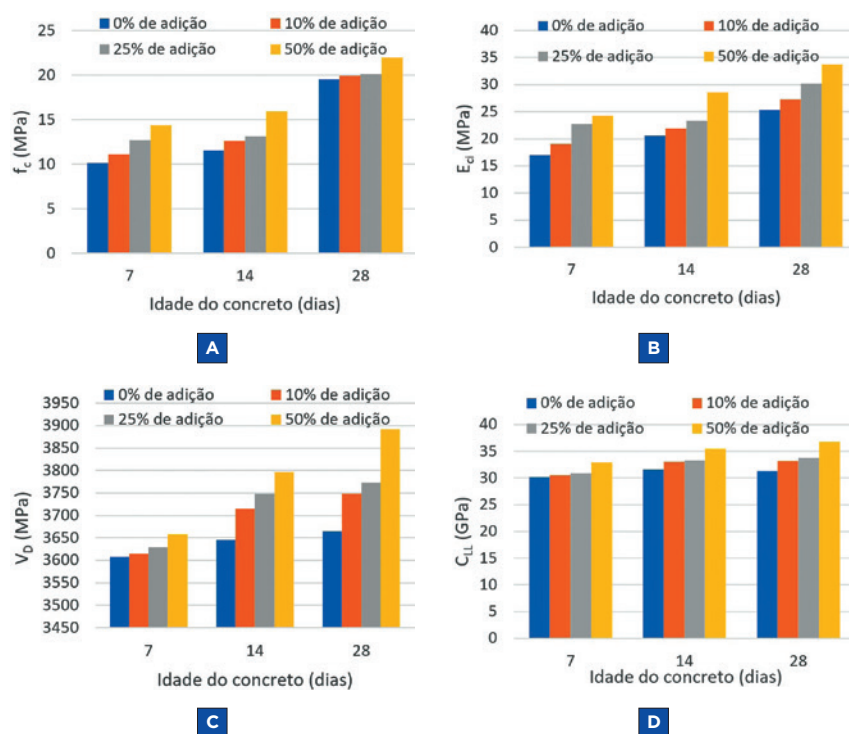


FIGURA 3

COMPORTAMENTO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ACÚSTICAS EM FUNÇÃO DA IDADE DO CONCRETO E DAS CONCENTRAÇÕES DAS ADIÇÕES DE PÓ DE FERRO NA MATRIZ CIMENTÍCIA. (A) RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (f_c); (B) MÓDULO DE ELASTICIDADE (E_c); (C) VELOCIDADE DIRETA (V_D); (D) COEFICIENTE DE RIGIDEZ (CLL)

FONTE: AUTORES (2023)

de 50% em pó de ferro. As adições de pó de ferro aumentaram a trabalhabilidade dos traços de concreto, conservando as características de coesão, homogeneidade, evitando os processos de segregação e exsudação.

A variação de densidade com a adição de pó de ferro, considerando o material sem adição mineral, teve um aumento em torno de 3 a 6%, respectivamente, para todas as idades conforme Tabela (3). Esse aumento na densidade está relacionado à elevada massa unitária da adição de pó de ferro, que promove o aumento da compactidade do esqueleto granular do concreto, elevando consequentemente a massa específica do compósito.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), este aumento da densidade é causado pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, alterando a microestrutura da zona de transição, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que, normalmente, fica retido sob os agregados.

As maiores variações em função da adição de pó de ferro foram obtidas nas propriedades mecânicas (f_c e E_{ci}) e acústicas (V_D e C_{LL}) para todas as idades consideradas (Figura 3). As propriedades de resistência e de rigidez (f_c e E_{ci}) foram as que tiveram as maiores variações em função das adições minerais, enquanto que a velocidade e o coeficiente de rigidez (V_D e C_{LL}) apresentaram, apesar de crescentes, menores variações com o aumento das concentrações de pó de ferro (Figura 3).

Para todos os parâmetros obtidos, houve um acréscimo aos 28 dias, considerando as adições de (10%, 25% e 50%) em relação ao traço sem adição de pó de ferro.

Para os ensaios destrutivos, ocorreram aumento de 2%, 3% e 11% para a resistência à compressão (f_c) e de 7%, 16% e 25% para o módulo de elasticidade (E_{ci}). Quanto aos ensaios não destrutivos, ocorreram aumentos de 6%, 7% e 15% para o coeficiente de rigidez (C_{LL}) e de 2%, 3% e 6%, respectivamente, para a velocidade direta de ultrassom (V_D), conforme apresentado na Figura (3). A adição mineral preenche os poros

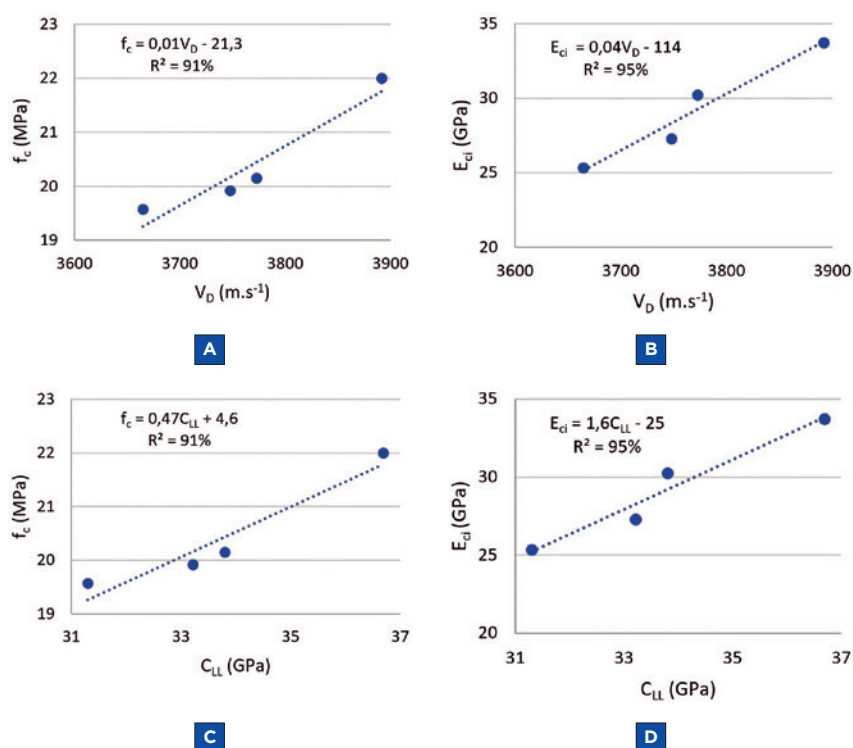


FIGURA 4

MODELOS DE REGRESSÃO OBTIDOS ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ACÚSTICAS. (A) RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (f_c) E VELOCIDADE DIRETA (V_D); (B) MÓDULO DE ELASTICIDADE (E_{ci}) E VELOCIDADE DIRETA (V_D); (C) RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (f_c) E COEFICIENTE DE RIGIDEZ (C_{LL}); (D) MÓDULO DE ELASTICIDADE (E_{ci}) E COEFICIENTE DE RIGIDEZ (C_{LL})

FONTE: AUTORES (2023)

microscópicos da matriz cimentícia, resultando em uma propagação de onda mais rápida. De acordo com Bitá *et al.* (2016), a interação da onda com a microestrutura causa perdas por atenuação, assim a quantidade de agregado incorporado à matriz cimentícia desempenha um papel importante na propagação de ondas, aumentando consideravelmente a velocidade da onda. Assim, devido ao fator de diminuir a porosidade do concreto, um concreto menos poroso e com, portanto, um menor número de pontos de atenuação, fornecerá um ambiente mais propício à propagação rápida das ondas, enquanto que um concreto poroso terá um número maior de pontos de atenuação, acarretando na diminuição da velocidade da onda ultrassônica, assim o uso da adição de pó de ferro parece ter um impacto mais definitivo em controlar a atenuação da energia ultrassônica.

Estudos realizados por Silva (2005)

demonstraram os benefícios das adições minerais em concreto, devido a diminuição da porosidade com a idade, oriunda da hidratação da matriz cimentícia, preenchendo os vazios por meio do empacotamento dos grãos de cimento na zona de transição. A escolha da adição mineral a ser empregada deve contemplar aspectos diferenciados daqueles que são normalmente adotados, ou seja, devem ser verificados aspectos referentes ao estado de aglomeração ou de dispersão das partículas, que é consequência de sua natureza química e física (MORAES, 2010). A utilização de minerais de ferro deve ser verificada, de modo a avaliar como sua atuação irá preencher os poros e promover a manutenção ou melhoria das propriedades da matriz cimentícia (ALMADA, 2020).

Os modelos gerados entre os parâmetros não destrutivos (V_D e C_{LL}) e os destrutivos (f_c e E_{ci}), foram todos

TABELA 4

VALORES ABSORÇÃO POR IMERSÃO, E VELOCIDADE DIRETA MÉDIA (V_D), PARA OS TRAÇOS PRODUZIDOS COM DIFERENTES ADIÇÕES DE PÓ DE FERRO

Adições	Absorção (%)	V_D (m.s ⁻¹)
0%	9,4	2908
10%	9,10	3025
25%	8,80	3048
50%	8,20	3313

FONTE: AUTORES (2023)

estatisticamente significativos (P-valor<0,05), sendo que as melhores correlações foram obtidas para a previsão da rigidez (E_{ci}) (Figura 4). Os modelos obtidos entre resistência à compressão (f_c) e velocidade direta (V_D) apresentam coeficientes de determinação (R^2) próximos 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). 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 entre os parâmetros de rigidez (C_{LL}) e as propriedades mecânicas de resistência (f_c) e de módulo de elasticidade (E_{ci}) obtidos em ensaios de ultrassom e de compressão, respectivamente, foram encontrados em Silva (2020), com modelos lineares e valores de R^2 na faixa de 85% a 97% para E_{ci} e de 79% a 95% para f_c .

Na Tabela (4), são apresentados os resultados obtidos de absorção por imersão e a velocidade de propagação de onda ultrassônica longitudinal das amostras ensaiadas após a saturação. A absorção de água está diretamente relacionada com a porosidade do material. Concretos que apresentam elevados valores para a absorção de água representam estruturas com maiores índices de vazios (Tabela 4). Considera-se, assim, que as adições minerais colaboraram para o preenchimento dos poros do concreto, devido ao diâmetro das partículas e à redução da porosidade em função da

elevação da compacidade e da massa específica (SANTOS, 2019).

A regressão entre a velocidade de ultrassom e a absorção apresentou modelo com R^2 de 96% (Figura 5) e P-Valor de 0,02, menor que 0,05, demonstrando existir uma relação estatisticamente significativa entre os parâmetros, com nível de confiança de 95,0%. Os resultados obtidos indicam que o aumento das adições de pó de ferro diminuiu a porosidade das amostras e, com isso, houve consequente diminuição do teor de água dentro das amostras de concreto, aumentando a velocidade da propagação de ondas de ultrassom. Esta diminuição do teor de água contribui para diminuir a distância entre partículas, favorecendo a ligação dos hidratos durante a fase sólida, formando uma microestrutura densa, o que facilita a propagação de onda acústica com uma velocidade de onda mais rápida (ZHANG *et al.*, 2015).

As adições minerais utilizadas no presente trabalho influenciaram na configuração da microestrutura interna do concreto, principalmente no tamanho dos poros e na sua distribuição, e consequentemente, na resistência mecânica. Os resultados obtidos no presente estudo estão coerentes com a literatura, que indicam que as adições minerais diminuem tanto a porosidade da zona de transição quanto a conectividade entre os poros, melhorando tanto as propriedades físicas, como as mecânicas e as acústicas (WINSLOW E COHEN, 1994; SILVA, 2005; GODINHO, 2020).

4. CONCLUSÕES

A adição mineral de pó de ferro nas concentrações 10%, 25% e 50% em função da massa de cimento contribui para o aumento das propriedades mecânicas de resistência à compressão (f_c) e módulo de elasticidade (E_{ci}), e das propriedades acústicas como velocidade direta (V_D) e coeficiente

de rigidez (C_{LL}). O uso desses resíduos na composição do concreto pode aumentar os parâmetros mecânicos e físicos, ao modificar a sua microestrutura.

As correlações entre os parâmetros mecânicos e acústicos foram estatisticamente significativas com elevados coeficiente de determinação (R^2 superiores a 91%). 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 produzidos especificamente com diferentes teores de adições minerais de pó de ferro.

Os modelos de predição do módulo de elasticidade (E_{ci}) do concreto por meio do ensaio de ultrassom apresentaram melhores correlações do que os modelos de predição da resistência à compressão (f_c). O coeficiente de rigidez obtido por ultrassom (C_{LL}) apresentou melhor correlação com os parâmetros de rigidez (E_{ci}) e de resistência à compressão (f_c) do concreto do que a velocidade de propagação das ondas (V_D). Este resultado, como esperado pelas bases teóricas do ensaio de propagação de ondas, também é esperado, já que o coeficiente de rigidez inclui parâmetro físico do concreto (densidade).

A adição mineral de pó de ferro reduziu a absorção de água nas amostras de concreto, fato ocasionado pela redução da porosidade do material, em função da elevação da compacidade e da massa específica e, consequentemente,

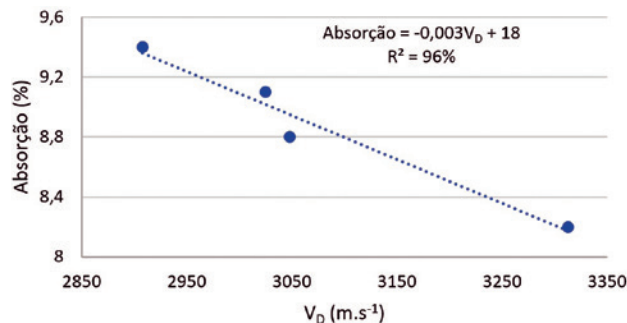


FIGURA 5

MODELO DE REGRESSÃO ENTRE ABSORÇÃO POR IMERSÃO E VELOCIDADE LONGITUDINAL

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2023)

houve aumento das propriedades mecânicas. Com o ensaio de propagação de ondas de ultrassom foi possível verificar a redução da porosidade do material em função do aumento da velocidade com o

aumento da concentração de adição de pó de ferro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de

Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) de São Paulo pelo financiamento dos diversos projetos do grupo de pesquisa, que viabilizou as instalações e infraestrutura utilizadas nesta pesquisa. 

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMADA, B. S. Influência da heterogeneidade de rejeitos de minério de ferro utilizados como adição mineral nas propriedades de microconcretos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas, p.135. 2021.
- [2] AMÂNCIO, F. A.; de OLIVEIRA Dias, A. R.; LUCAS, S. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. Correlação entre o ensaio de ultrassom e as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos convencionais. *Revista Técnico-Científica*, 2019.
- [3] ANDRADE, D. S.; FIGUEIREDO, E. J. P. Estimativa da Resistência à compressão do concreto por meio de ensaios não destrutivos no estádio Maracanã. *CONCRETO & CONTRUÇÃO*, v. 74, p. 94-99, 2014.
- [4] BITA, H.; FAIZ, B.; MOUDDEN, A.; LOTFI, H.; OUACHA, E. H.; BOUTAIB, M. Evaluation of Ultrasonic Attenuation in Mortars Structures Using the Argand Diagram. *International Journal of Materials Engineering*, v. 6, n. 3, p. 77-84, 2016.
- [5] BOUCHHIMA, L.; ROUIS, M. J.; CHOURA, M. Correlation of ultrasound pulse velocity with Mechanical properties and water absorption in Phosphogypsum-crushing sand-lime-cement building bricks. *International Journal for Research in applied Science and Engineering Technology*. Vol. 1 Issue IV, November 2013.
- [6] DEMIRBOĞA, R.; TÜRKMEN, İ.; KARAKOC, M. B. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. *Cement and concrete research*, 34 (12), 2329-2336. 2004.
- [7] DINIZ, H. A. A.; DE OLIVEIRA, J. N.; DA SILVA, L. P.; DE MACÊDO, M. S.; DE SOUZA, M. M. Caracterização e avaliação das propriedades de concretos autoadensáveis com adições minerais e baixo consumo de cimento. *HOLOS*, V. 5, P. 51-64, 2018.
- [8] GODINHO, J. P.; JUNIOR, T. F. S.; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, M. S. A. Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. 13. ed. Curitiba: Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, 2020.
- [9] HAMID, R.; YUSOF, K.M.; ZAIN, M.F.M. Um método combinado de ultra-som aplicado a concreto de alto desempenho com sílica ativa. *Materiais de Construção e Construção*, 24 (1), p.94-98, 2010.
- [10] 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.
- [11] MORAES, K. A. M. Otimização do uso de adições minerais para produção de concreto auto-adensável. 212 f. TCC (Graduação) — Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- [12] RODRIGUES, G. S. S. FIGUEIREDO, E. J. P. Módulo de elasticidad estático del hormigón determinado por medio de pruebas de ultrasonido. *Materiales de Construcción (Madrid)*, v. 53, p. 327-336, 2003.
- [13] SANTOS, R. Propriedades físico-mecânicas e colorimétricas do concreto pigmentado com óxido de ferro vermelho e preto: haahahah. 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.
- [14] SILVA, G. J. B. Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato. 107 f. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação) — Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Ciência dos Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- [15] 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.
- [16] TUTIKIAN, B. F. e DAL MOLIN. *Concreto Autoadensável*. São Paulo: Editora PINI Ltda., 2008.
- [17] ULUCAN, Z. Ç.; TÜRK, K.; KARATAŞ, M. Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 44(5), 367-374. 2008.
- [18] UYSAL, M.; SUMER, M. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Construction and Building materials*, 25(11), 4112-4120. 2011.
- [19] WINSLOW, D. N.; COHEN, M. D. Percolation and pore structure in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 24, p. 25-37, 1994.
- [20] YILDIRIM, H.; SENGUL, O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 4, p. 1645-1652, 2011.
- [21] ZHANG, J.; HOU, D.; HAFIZ, R. B.; HAN, Q.; MA, H. Monitoring setting and hardening of concrete by active acoustic method: effects of water-to-cement ratio and pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*, v. 88, p. 118-125, 2015.