

# Interação da resistividade elétrica com esclerometria e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

*Interaction of electrical resistivity with rebound hammer and ultrasonic velocity test*

*Interacción de la resistividad eléctrica con la esclerometría y el ultrasonido*

**Antônio Carlos Assis Leonel** 

ATC Engenharia e Consultoria, ATC, Brasil.  
Goiânia (GO), Brasil

**Andrielli Moraes de Oliveira** \* 

Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental.  
Goiânia (GO), Brasil.  
andriellimoraes@ufg.br

**Oswaldo Cascudo** 

Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental.  
Goiânia (GO), Brasil.

\* Autora correspondente.

## CRediT

**Contribuição de autoria:** Curadoria de dados, coleta de dados, metodologia, redação – rascunho original, redação – revisão e edição: LEONEL, A. C. A.; Concepção, análise, coleta de dados, metodologia, supervisão, validação, visualização, redação – rascunho original, redação – revisão e edição: OLIVEIRA, A. M.; Concepção, análise, coleta de dados, metodologia, supervisão, validação, visualização, redação – rascunho – original, redação – revisão e edição: CASCUDO, O.

**Conflitos de interesse:** Os autores certificam que não há conflito de interesse.

**Financiamento:** Eletrobrás FURNAS

**Aprovação de ética:** Não se aplica.

**Uso de IA:** Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do trabalho.

**Editores responsáveis:** Daniel Sant'Ana (Editor-Chefe); Vanda Alice Garcia Zanoni (Editora Associada); Simone Buiate Brandão (Assistente editorial).

## Resumo

Programas periódicos de inspeção em estruturas de concreto armado são fundamentais para o planejamento de manutenções e para um melhor controle do comportamento estrutural nas condições de serviço. Dentro desse contexto, ensaios não destrutivos (END) se apresentam como importantes ferramentas voltadas ao monitoramento da integridade de estruturas, uma vez que oferecem parâmetros quali-quantitativos que auxiliam na avaliação, na análise e em um diagnóstico assertivo. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a interação da resistividade elétrica (Re) do concreto com os parâmetros oriundos das técnicas de esclerometria (IE) e velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU) durante os primeiros 28 dias de idade em dois concretos estruturais (de classes de resistência C25 e C45). Como resultado, foram obtidas altas correlações entre IE e Re, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) iguais a 0,83 e 0,88, assim como entre IE e Rv, com  $R^2$  iguais a 0,91 e 0,96, para C25 e C45, respectivamente. Ao mesmo tempo, coeficientes de determinação entre 0,85 e 0,96 foram obtidos nas correlações entre a velocidade de pulso ultrassônico e os dados de resistividade (Re e Rv) nos dois concretos estudados. Por fim, foram observados coeficientes de determinação ( $R^2$ ) muito elevados, acima de 0,93, nas relações de VPU e IE com resistência à compressão e módulo de elasticidade para os dois concretos avaliados. Isso demonstra a grande potencialidade da técnica de resistividade elétrica como um indicador de durabilidade do concreto, bem como para uso complementar em inspeções de campo de estruturas de concreto.

**Palavras-chave:** Concreto, Resistividade elétrica, Esclerometria, Velocidade de propagação do pulso ultrassônico, Ensaios não destrutivos.

## Abstract

Periodic inspection programs in reinforced concrete structures are essential for planning maintenance and for better control of structural behavior under service conditions. Within this context, non-destructive tests (NDT) prove to be an important tool for monitoring the integrity of structures, since they offer qualitative and quantitative parameters that help in the evaluation, analysis and an assertive diagnosis. So, the objective of this work is to evaluate the interaction of the electrical resistivity of concrete with the parameters of rebound hammer (IE) and ultrasonic pulse propagation velocity (US) techniques during the first 28 days of age of two structural concretes (C25 and C45 strength class concretes). For this purpose, two concrete resistivity techniques were considered, namely: surface apparent electrical resistivity (RE) and volumetric electrical resistivity (RV). As a result, high correlations were obtained between IE and RE, with coefficients of determination ( $R^2$ ) equal to 0.83 and 0.88, as well as between IE and RV, with  $R^2$  equal to 0.91 and 0.96, for C25 and C45, respectively. At the same time, coefficients of determination between 0.85 and 0.96 were obtained in the correlations between the ultrasonic pulse velocity and the resistivity data (RE and RV), in the two concretes studied. Finally, very high coefficients of determination ( $R^2$ ) were observed, above 0.93, in the relationships of VPU and IE with compressive strength and modulus of elasticity, for the two concretes evaluated. This demonstrates the great potential of the electrical resistivity technique, as an indicator of concrete durability, for complementary use in field inspections of concrete structures.

**Keywords:** Concrete, Electrical resistivity, Rebound hammer, Ultrasonic pulse propagation velocity, Non-destructive tests.

## Resumen

Los programas de inspección periódica de estructuras de hormigón armado son fundamentales para planificar el mantenimiento y para un mejor control del comportamiento estructural en condiciones de servicio. En este contexto, los ensayos no destructivos (END) son herramientas importantes destinadas a monitorear la integridad de las estructuras, ya que ofrecen parámetros cualitativos y cuantitativos que ayudan en la evaluación, análisis y diagnóstico asertivo. Así, el objetivo de este trabajo es evaluar la interacción de la resistividad eléctrica del hormigón con los parámetros derivados de las técnicas de esclerometría (IE) y velocidad de propagación del pulso ultrassónico (VPU) durante los primeros 28 días de edad en dos hormigones estructurales (de clases de resistencia C25 y C45). Como resultado, se obtuvieron correlaciones altas entre IE y RE, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) iguales a 0,83 y 0,88, así como entre IE y RV, con  $R^2$  igual a 0,91 y 0,96, para C25 y C45, respectivamente. A su vez, se obtuvieron coeficientes de determinación entre 0,85 y 0,96 en las correlaciones entre la velocidad del pulso ultrassónico y los datos de resistividad (RE y RV), en los dos hormigones estudiados. Finalmente, se observaron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) muy altos, superiores a 0,93, en las relaciones de VPU e IE con la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, para los dos hormigones evaluados. Esto demuestra el gran potencial de la técnica de resistividad eléctrica como indicador de la durabilidad del hormigón, así como para uso complementario en inspecciones de campo de estructuras de hormigón.

**Palabras-clave:** Hormigón, Resistividad eléctrica, Esclerometría, Velocidad de propagación del pulso ultrassónico, Ensayos no destructivos.

## 1 Introdução

Estruturas de concreto armado devem atender a requisitos de resistência mecânica, desempenho e durabilidade ao longo de sua vida em serviço (ABNT NBR 6118, 2023). No entanto, sem um plano eficiente e estratégico de inspeção e de manutenção, essas estruturas de concreto podem ter sua segurança e estabilidade comprometidas, além da possibilidade de altos investimentos financeiros para recuperação e transtornos sociais à dinâmica das cidades.

Neste contexto, END (ensaios não destrutivos) não causam danos as estruturas e podem ser ferramentas complementares importantes para inspeções *in situ* e para o monitoramento da integridade e da vida útil dessas estruturas (MEHRABI, FARHANGDOUST, 2018). Além disso, essas técnicas possuem custo acessível, resultados rápidos e permitem avaliação *in situ* e em laboratório (ACI, 2019). Dentre os ensaios não destrutivos, as técnicas de esclerometria e de propagação de ondas ultrassônicas são muito conhecidas, sendo largamente empregadas tanto no meio técnico-profissional quanto nas pesquisas científicas e tecnológicas (BREYSSE, 2012; ACI, 2019; TSILOULOU; LAMPROPOLULOS; PASCHALIS, 2017). De maneira sumária, essas técnicas têm muito potencial para a avaliação da homogeneidade do concreto na estrutura, sendo capazes de identificar falhas, defeitos localizados e não conformidades de lotes ou regiões do concreto na estrutura. Na literatura, há correlações tanto do índice esclerométrico (IE) quanto da velocidade de propagação do pulsos ultrassônicos (VPU) ou ondas ultrassônicas com a resistência mecânica à compressão do concreto, o que destaca um bom potencial dessas técnicas dentro dessa perspectiva de estimativa da resistência, porém as análises neste campo devem ser muito criteriosas, pois há muitos fatores que podem desviar os valores estimados dos valores reais de resistência. É preciso salientar que a esclerometria, a rigor, avalia um aspecto superficial do concreto (a dureza superficial), enquanto a resistência à compressão é uma propriedade volumétrica do concreto, a passo que condições como a umidade interna do concreto (grau de saturação do poros) e a densidade de armaduras no elemento em concreto armado pode produzir desvios nos valores esperados da propagação do pulso ultrassônico. De toda maneira, são técnicas muito práticas e sensíveis, que podem auxiliar enormemente nas inspeções e avaliações estruturais. Em especial sobre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico, é possível obter subsídios sobre a qualidade do concreto e sobre a existência de falhas internas bem como é factível estimar a profundidade de fissuras e detectar diferenças de características entre camadas de concreto (ABNT, 2019; GRACE; JOHN, 2019; SILVA *et al.*, 2019). Por meio desta técnica, também é possível a estimativa do valor de módulo de elasticidade dinâmico (BS, 2021). Por fim, cabe salientar que a velocidade de propagação de onda ultrassônica (pulso ultrassônico) e o índice esclerométrico podem ser utilizados tanto como dados de entrada para a otimização da composição de concretos, como na gestão do processo executivo da estrutura, em termos da otimização dos períodos de cura e de retirada de fôrmas e descimbramento (LEHNER; HRABOVÁ, 2022).

Importante mencionar que muito embora haja uma razoável variedade de técnicas não destrutivas, não há um guia de seleção unificado para métodos no campo dos ENDs. Ao mesmo tempo, os ensaios não destrutivos raramente resultam em um "número" que pode ser interpretado de forma inequívoca, ou seja, sempre é necessária uma análise técnica-tecnológica baseada em engenharia e ciência (NEVILLE; BROOKS, 2013; NEVILLE, 2016).

Ademais, uma outra dificuldade no uso dos ENDs reside no fato de que parâmetros físicos a serem obtidos dependem de vários parâmetros do concreto e das condições ambientais, cujos efeitos são difíceis de desacoplar (BREYSSE *et al.*, 2008; LIM; CAO, 2013; CAMARGO; FERRARI, 2021). Nesta direção, alguns estudos têm se dedicado a combinações de técnicas não destrutivas para uma maior confiabilidade em resultados obtidos, visando um diagnóstico mais assertivo da condição real de estruturas ou, ainda, para se obter correlações entre técnicas (estimar um parâmetro de uma técnica a partir dos valores obtidos de outra técnica).

Como um indicador de durabilidade do concreto, a resistividade elétrica pode agregar em muito nas inspeções de campo, por apresentar-se de maneira 100% não destrutiva, de fácil uso e interpretação e de resultado imediato, além de, indiretamente, trazer informações (no campo da durabilidade) sobre o grau de ionização da solução do poro, possibilitando, por exemplo, a inferência sobre uma eventual contaminação do concreto por cloretos ou sulfatos (SILVA, 2016; OLIVEIRA; CASCUDO, 2018; CASCUDO *et al.*, 2021). De modo geral, a resistividade está atrelada a características do concreto associadas à sua microestrutura, estando, assim, apta a avaliar a maior ou menor porosidade do concreto, bem como é bastante sensível à presença de íons em solução. Dessa forma, trata-se de um indicador que se correlaciona muito bem com o coeficiente de difusão ou migração de cloretos (CASCUDO *et al.*, 2021), apresentando-se, portanto, como um parâmetro naturalmente afeito às análises sobre a corrosão da armadura, como relatado na literatura (CASCUDO, 1997; MEDEIROS, 2001; SENGUL, 2014; LAYSSI *et al.*, 2015; OLIVEIRA; CASCUDO, 2018; CASCUDO *et al.*, 2021; CHEYTANI; CHAN, 2021; ARAÚJO; MACIOSKI; MEDEIROS, 2021). Não se pode deixar de destacar a significativa relação da resistividade com a umidade interna do concreto, o que projeta a medida como um potencial parâmetro de avaliação do grau de saturação dos poros (CASCUDO, 1997). Outras aplicações da resistividade elétrica estão relacionadas às previsões de resistência à compressão e módulo de elasticidade, ao acompanhamento do processo de hidratação da pasta de cimento e à detecção de fissuras e defeitos no concreto (LAYSSI *et al.*, 2015; GHODDOUSI; SAADABADI, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2018; CASCUDO *et al.*, 2021; CHUNG *et al.*, 2021; PAN *et al.*, 2022).

Como discutido anteriormente, a resistividade pode agregar muito nas análises do concreto estrutural, uma vez que ela permeia tanto aspectos físico-mecânicos do concreto (a porosidade, por exemplo) como aspectos químicos, como o grau de ionização da solução do poro. Dessa forma, ela tem potencial para capturar informações amplas do concreto, sejam elas ligadas às suas propriedades mecânicas e elásticas, sejam elas ligadas às propriedades de durabilidade. De forma bem simples e imediata, aplicando-se um raciocínio lógico, altos valores de resistividade elétrica (por exemplo, acima de 20 k $\Omega$ .cm) podem estar ligados a concretos pouco porosos ou secos e com pouca probabilidade de corrosão nas armaduras (BROOMFIELD, 1997; CASCUDO, 1997; PEDROSA; ANDRADE, 2021).

Como se sabe, da literatura, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade são propriedades importantes do ponto de vista estrutural e com vistas ao controle tecnológico do concreto, mas não são parâmetros plenamente suficientes do ponto de vista de durabilidade, sobretudo em estruturas de concreto armado expostas a condições severas (MATARUL *et al.*, 2016; MEDINA *et al.*, 2016; ELKHALDI *et al.*, 2022; MARTINS *et al.*, 2022; WALLY *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2023). Nesta direção, a resistividade elétrica pode

agregar muito valor, dando informações valiosas associadas à durabilidade, além de informações gerais sobre as características do concreto.

Dentro deste cenário, o presente trabalho se propõe a avaliar a interação da resistividade elétrica aparente superficial –  $R_e$  (método de Wenner - 4 pontos) e resistividade elétrica volumétrica -  $R_v$  - com os parâmetros de esclerometria (IE) e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (VPU) durante os primeiros 28 dias de idade do concreto. Para tanto, foram estudados concretos com classe de resistência C25 e C45 (ABNT NBR 8953, 2015), sob condições de cura úmida. Essas classes de resistência à compressão atendem a parâmetros normativos da ABNT NBR 6118 (2023) para as classes de agressividade ambiental (CAA) de I a IV, que se referem, respectivamente, a níveis de agressividade fraco a muito forte, com riscos de deterioração insignificante a elevado para estruturas de concreto armado. Assim, a expectativa é que o acréscimo do parâmetro de resistividade elétrica em inspeções de campo possa adicionar valor nas avaliações estruturais, em especial no contexto da durabilidade, somando-se os conteúdos e ao potencial já conhecidos das técnicas consagradas de esclerometria e velocidade de propagação de pulso ultrassônico.

## 2 Materiais e métodos

As dosagens dos concretos escolhidos (Tabela 1) apresentaram classe de resistência à compressão de 45 MPa e 25 MPa (ABNT, 2015) aos 28 dias de idade e abatimento classe S-160, tido como concreto bombeável e com aplicação típica para produção de elementos estruturais (ABNT, 2016). Optou-se pela não utilização de adições minerais nos concretos em função dos efeitos de ganho de resistência e alteração das condições de permeabilidade e porosidade no concreto. Manteve-se o mesmo consumo de agregados miúdos e graúdos por metro cúbico na mistura nos dois concretos. Dessa forma, a escolha da variável classe de resistência derivou apenas da variação do consumo de cimento por metro cúbico de concreto e da relação água/cimento.

**Tabela 1:** Composição dos concretos classe C45 MPa e C25 MPa estudados.

Descrição	Concreto classe C45		Concreto classe C25	
	Dosagem unitária (kg)	Consumo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Dosagem unitária (kg)	Consumo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Cimento Portland CP II F 40	1,00	350	1,00	310
Areia média de origem natural	2,04	714	2,30	714
Pedra britada de origem granítica – 19 mm	3,09	1082	3,49	1082
Aditivo super plastificante	0,0015	0,5250	0,0010	0,3100
Relação água/cimento (a/c)	0,50	175	0,60	186

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm e 15x30 cm, além de 2 prismas com dimensões de 20x30x55 cm. A moldagem foi realizada de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2016). Ademais, o procedimento de cura adotado foi cura úmida em ambiente climatizado com temperatura controlada de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar acima de 95%.

Os concretos foram caracterizados quanto a resultados médios de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Contudo, antes de cada idade, realizou-se a retífica de topo e base dos corpos de prova cilíndricos e, durante o ensaio, foram utilizados discos de neoprene (confinados em pratos metálicos para uma distribuição uniforme das tensões). Os ensaios foram realizados em prensa hidráulica classe I com capacidade máxima de 2000 KN, sob uma velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s. A Tabela 2

resume as idades de ensaio, dimensões e número de corpos de prova utilizados no estudo.

**Tabela 2:** Detalhamento do programa experimental: técnicas, idades de ensaio, dimensões e quantidade de corpos de prova utilizados.

Ensaio	Norma de Referência	Idades de Ensaio	Corpos de Prova (CP)
Resistência à compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2018)	1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias	Média de resultados de 3 CP's de 10x20 cm cilíndricos por idade
Módulo de elasticidade	NBR 8522 (ABNT, 2021)	1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias	Média de resultados de 3 CP's de 15x30 cm cilíndricos por idade
Velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU)	NBR 8802 (ABNT, 2019)	1 a 28 dias	Média de 3 leituras no CP prismático
Índice esclerométrico (IE)	NBR 7584 (ABNT, 2012a)	3, 7, 14, 21 e 28 dias	Média de 16 leituras no CP prismático
Resistividade elétrica superficial (Re)	ASTM G57 (ASTM, 2020)	1 a 28 dias	Média de 5 leituras no CP prismático
Resistividade elétrica volumétrica (Rv)	NBR 9204 (ABNT, 2012b)	1 a 28 dias	Média de 3 leituras em 3 CP's de 10x20cm

O ensaio de propagação da onda ultrassônica foi realizado de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019), por meio do equipamento de fabricante PROCEQ, modelo Pundit Lab +, com o uso de transdutores com frequência de 54 kHz (Figura 1, à esquerda). Foi utilizada a metodologia direta com a média das leituras nas laterais (30 cm de espessura) do corpo de prova prismático, sendo realizadas três leituras em cada ponto de medição e em três pontos de alturas diferentes, distantes entre si aproximadamente 15 cm. Não foi excluído valores dessa medição para o cálculo médio da VPU. A opção pela realização de alturas de medição de onda ultrassônica deu-se, principalmente, para atenuar possível efeito de adensamento do concreto nos valores de velocidade de onda obtidos.

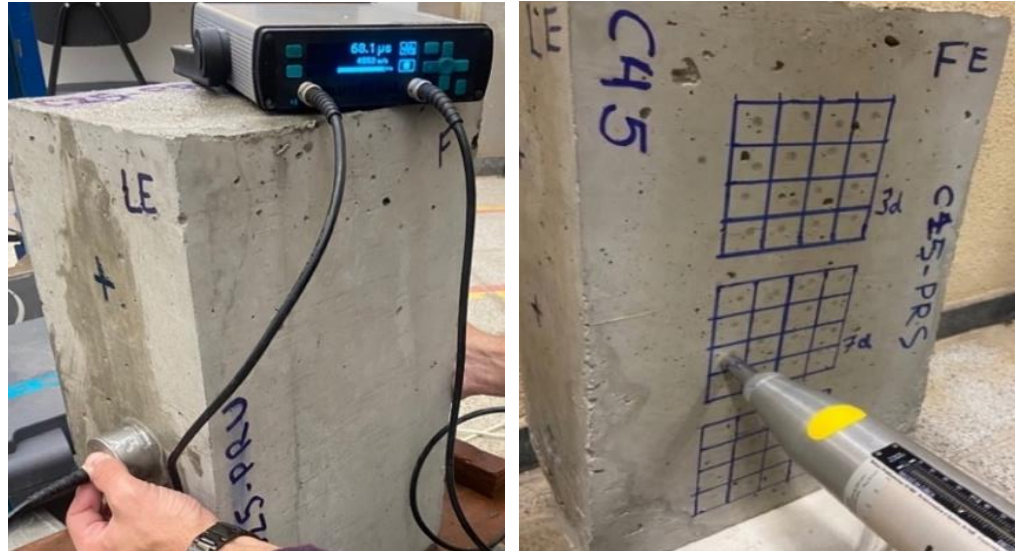
Também foi realizado o ensaio de dureza superficial dos concretos, por meio do IE em prismas (Figura 1 à direita). O ensaio foi realizado de acordo com as orientações da NBR 7584 (ABNT, 2012a) e com o uso do esclerômetro de reflexão Schmidt, de fabricante PROCEQ modelo N-34.

Optou-se pela não realização do ensaio de IE no 1º dia de idade, pois em idades muito precoces, o ensaio pode causar micro fissuração e danos indesejados próximos à superfície do concreto. Em cada uma das idades de realização do ensaio foram efetuados 16 impactos sobre a superfície do prisma, na direção horizontal. Os resultados obtidos foram registrados e aqueles que diferiram mais que 10% da média aritmética foram desconsiderados e uma nova média aritmética foi calculada (ABNT, 2012a).

Para a realização dos ensaios de resistividade elétrica superficial aparente (Re) e resistividade volumétrica (Rv), utilizou-se o equipamento de fabricante PROCEQ, modelo Resipod. O método superficial foi realizado, baseado na ASTM G57 (2020), por meio da sonda com espaçamento entre eletrodos de 38 mm e leituras realizadas em corpos de prova prismáticos (Figura 2 à esquerda). Além disso, o prisma de concreto também propiciou uma maior área possível de se realizar medições. Como o prisma foi moldado também para outros END, preferiu-se a utilização do mesmo para resistividade elétrica superficial. Os ensaios de resistividade elétrica volumétrica foram baseados na NBR 9204 (ABNT, 2012b) e foram realizados nos corpos de prova cilíndricos 10x20 cm (Figura 2 à direita) para se evitar o "efeito de borda" nos resultados. Por fim, cabe ressaltar que os prismas e os CP's foram moldados com o mesmo concreto, sob as mesmas condições de adensamento e cura e que os dados obtidos nas leituras de resistividade foram

registrados no equipamento e salvos posteriormente em um computador por meio do *software ResipodLink* que permite a visualização, manipulação e exportação dos dados obtidos.

**Figura 1:** END realizados em prisma de concretos C45 e C25 MPa: propagação de ondas ultrassônicas (à esquerda) e ensaio de dureza superficial - esclerometria (à direita).



**Figura 2:** Ensaios de resistividade elétrica superficial no prisma (à esquerda) e volumétrica nos corpos de prova cilíndricos (à direita).



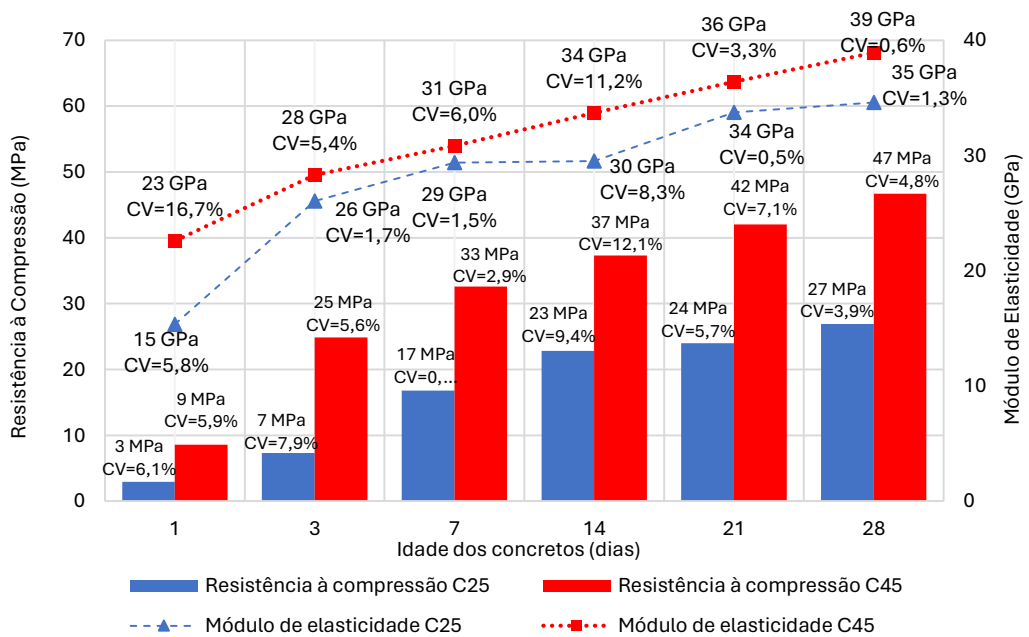
### 3 Resultados

#### 3.1 Caracterização da resistência à compressão e módulo de elasticidade

Os resultados médios da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos nas idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias estão apresentados na Figura 3. Como esperado, houve acréscimo da resistência à compressão e do módulo de elasticidade com o avanço da idade nos dois concretos (VELAY-LIZANCOS *et al.*, 2018; VIEIRA *et al.*, 2020). Para o concreto C45 verificou-se que aos 3 dias obteve-se 55% da resistência à

compressão esperada para 28 dias (25 MPa), 73% aos 7 dias e 82% aos 14 dias. Já no concreto C25, observou-se um percentual de 28% da resistência à compressão aos 3 dias, 68% aos 7 dias e 92% aos 14 dias. O consumo de cimento por metro cúbico do concreto C45 é maior que o C25 e isso pode explicar o maior acréscimo de resistência nos três primeiros dias. Em uma análise adicional também foi possível verificar a semelhança do crescimento de resistências nas idades iniciais com os resultados obtidos de resistência à compressão do cimento que, nas primeiras idades, apresentou valores de resistência à compressão bem acima dos requisitos mínimos estipulados pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

**Figura 3:** Resultados médios e de coeficientes de variação (CV), obtidos de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos nas idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias.



Outra observação são os valores de módulo de elasticidade elevados ainda em idades precoces nos dois concretos. A explicação para esse fenômeno pode ser atribuída à tipologia (granítica) e quantidade de agregados graúdos presentes na mistura (NEVILLE, BROOKS, 2013; MEHTA, MONTEIRO, 2014; VELAY-LIZANCOS *et al.*, 2018; GÓRA; PIASTA, 2020). O ganho progressivo do valor de módulo ao decorrer das idades a partir de 7 dias se dá devido ao ganho de resistência da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, BROOKS, 2013; MEHTA, MONTEIRO, 2014).

Do ponto de vista de desempenho, o concreto C25 apresenta um acréscimo de resistência aos 14 dias próximo da resistência esperada para os 28 dias, porém seu valor de módulo de elasticidade não demonstrou um ganho significativo entre o 7º e o 14º dia. Já o concreto C45 demonstra um crescimento de resistência acelerado aos 3 dias (55%), mas que cresce com uma intensidade menor entre o 7º e o 14º dia, com ganho absoluto de apenas 9%. Outro detalhe são os coeficientes de variação (CV) da resistência à compressão e do módulo de elasticidade que se apresentam relativamente baixos (menores que 12,1%) para todas as idades, validando a confiabilidade dos resultados obtidos.



### 3.2 Índice esclerométrico - IE

Os resultados médios de IE nas idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias, bem como seus respectivos coeficientes de variação (CV), estão indicados na Tabela 3.

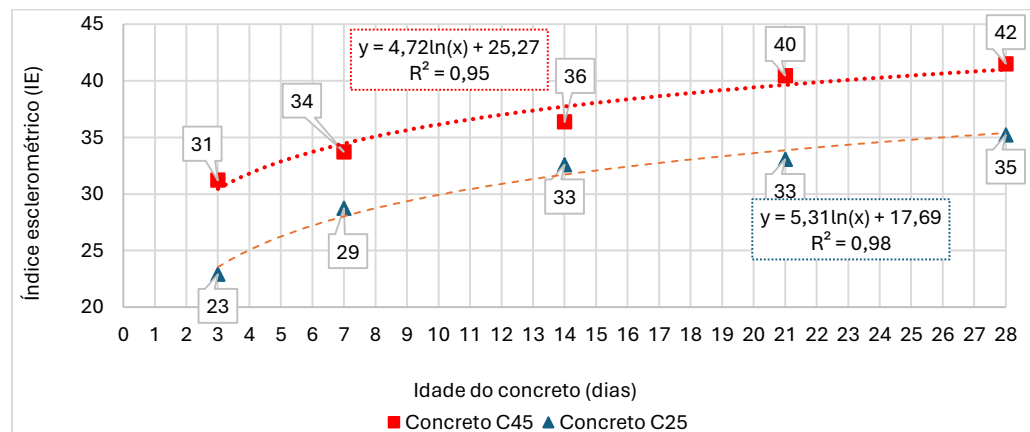
**Tabela 3:** Resultados médios dos ensaios de IE e respectivos coeficientes de variação (CV).

Idade	Concreto C25		Concreto C45	
	Índice esclerométrico (IE)	Coefficiente de variação (CV)	Índice esclerométrico (IE)	Coefficiente de variação (CV)
3 dias	23	4,2%	31	5,1%
7 dias	29	5,0%	34	4,9%
14 dias	33	4,6%	36	5,6%
21 dias	33	5,2%	40	5,7%
28 dias	35	3,9%	42	5,1%

Como esperado, nota-se uma tendência de crescimento nos IE com o acréscimo da idade. Sobretudo, nota-se baixos valores de variação nos ensaios, sendo os maiores valores da ordem de 5,2% para C25 e 5,7% para C45. Estes valores de coeficiente de variação tendem a apresentar baixa dispersão nos resultados (ABNT, 2012a; MEHTA; MONTEIRO, 2014; GÓRA; PIASTA, 2020). Assim, os resultados de esclerometria podem ser considerados confiáveis em função de um coeficiente de variação menor que 10%. Fato este já esperado para este ensaio, uma vez que a NBR 7584 (ABNT, 2012a) estabelece que são desprezados os valores que diferem em mais de 10% do valor médio obtido.

Em comparação ao concreto C45, nota-se que o concreto C25 apresenta um maior ganho percentual de dureza superficial entre 3 e 28 dias. Tal fato fica evidente quando se analisa as curvas de crescimento do índice esclerométrico dos dois concretos (Figura 4).

**Figura 4:** Correlação da evolução dos resultados médios de IE dos concretos C25 e C 45 estudados.



Adicionalmente, nota-se nos concretos estudados (C25 e C45) que o formato da linha de tendência logarítmica de crescimento do IE ao longo das idades é bastante parecido. As curvas dos dois concretos apresentam um certo grau de paralelismo, o que expressa um comportamento semelhante de crescimento ao longo das idades. Cabe ressaltar que a análise foi realizada para os dois concretos somente até 28 dias de idade

Os coeficientes de determinação  $R^2$  obtidos da Figura 4 de IE versus idade dos concretos foram de 0,98 para o C25 e 0,95 para o C45. Espera-se que a dureza superficial do concreto aumente ao longo do tempo, não só pelo ganho de resistência em função de sua hidratação, mas também por ação de carbonatação no concreto. Neste sentido, a

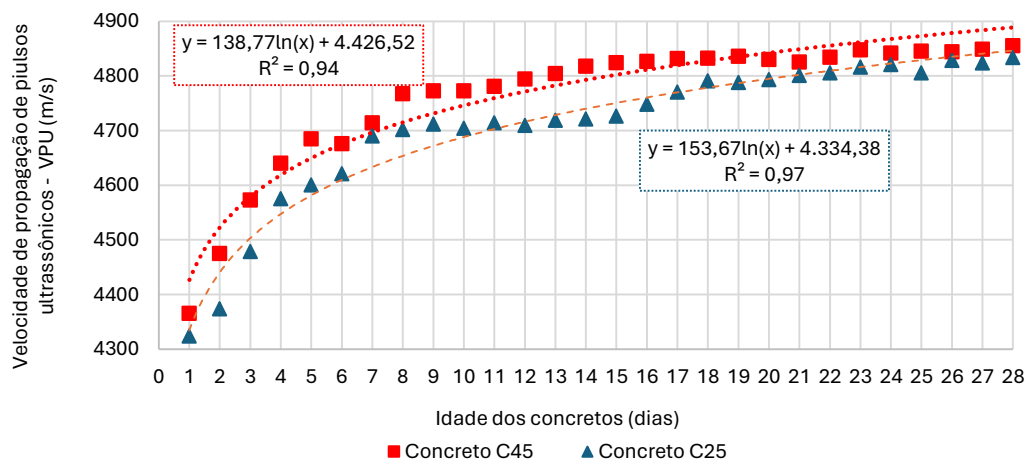
literatura (NEVILLE, BROOKS, 2013; MEHTA, MONTEIRO, 2014; GÓRA; PIASTA, 2020) apresenta que a carbonatação é um dos fatores que pode influenciar o valor de IE, uma vez que os elementos constituintes da matriz hidratada vão sendo substituídos por carbonatos, como resultado das reações com o dióxido de carbono. Esse fenômeno altera propriedades na superfície do concreto como alcalinidade, permeabilidade, porosidade, resistência mecânica e dureza superficial (CASCUDO, 1997; ABNT, 2012a; RIBEIRO *et al.*, 2018).

Concretos com menores valores de resistência à compressão, como o C25, apresentam também maior porosidade e facilidade de penetração de CO<sub>2</sub>, promovendo uma carbonatação e, conseqüentemente, uma maior dureza superficial em idades mais precoces. No concreto C45, devido sua menor porosidade, o efeito da carbonatação não é tão significativo para o ganho de dureza superficial quanto o efeito do ganho de resistência da pasta de cimento hidratada.

### 3.3 Velocidade de propagação de onda ultrassônica - VPU

A Figura 5 apresenta os resultados médios de VPU dos concretos estudados versus idade (1 a 28 dias).

**Figura 5:** Evolução dos valores médios de VPU dos concretos estudados versus idade (dias).



Como esperado, as velocidades de propagação de onda ultrassônica no concreto com maior resistência à compressão apresentam valores ligeiramente mais elevados, sendo aos 28 dias de 4.855,38 m/s para o C45 e de 4.833,60 m/s para o C25. É perceptível uma pequena diferença, em média de 2,0%, após o primeiro dia, no valor da velocidade de propagação da pulsos ultrassônicos entre o concreto C25 e C45. Apesar de pequena, nota-se que essa diferença se mantém aproximadamente constante nas idades iniciais até o 9º dia. Este efeito também foi observado pela literatura (VELAY-LIZANCOS *et al.*, 2018). Fatores como menor consumo de cimento e maior relação água/ligante no concreto C25 em relação ao C45, sugerem que ele possua uma maior porosidade. Assim, além de menor resistência característica, o concreto C25 tende a apresentar um maior tempo de propagação e, portanto, menor velocidade de onda.

Observou-se baixos coeficientes de variação nas medidas realizadas (entre o valor médio e os valores individuais), sendo em média de 1,2% para o concreto C25 e 0,7% para o C45. Os maiores valores de coeficiente de variação obtidos foram de 1,6% para o concreto C25 e 0,9% para o C45.

Cabe ressaltar ainda que, do ponto de vista de classificação da qualidade do concreto de acordo com a BS 1881-203 (1986), os dois concretos avaliados podem ser classificados como de excelente qualidade, pois após 28 dias de idade (e de cura em ambiente com 95% de umidade), apresentaram valores acima de 4.500 m/s para VPU.

É preciso, contudo, ponderar sobre os valores obtidos com cura úmida nos concretos. Não há dúvida que a cura exerce um efeito que qualifica a pasta de cimento e melhora a microestrutura do concreto. No entanto, o fato de se medir a propagação do pulso ultrassônico numa condição de saturação plena dos poros (caso dos concretos com cura úmida) gerou algum efeito no resultado final, possivelmente contribuindo para crescer os valores de velocidade de propagação. Este efeito concorreu para uma “normalização” dos resultados, ou seja, para uma aproximação dos valores de velocidade de propagação nos concretos C25 e C45, os quais, do ponto de vista de suas estruturas internas, são bem diferentes.

Além disso, a partir das curvas, pode-se extrair as equações logarítmicas que regem o crescimento da VUP nos dois concretos. Obteve-se  $R^2$  igual a 0,97 e 0,94 para as curvas de evolução dos concretos C25 e C45, respectivamente. A partir dessas curvas, observou-se uma tendência após os 14 dias, de estabilização na velocidade de propagação de pulso ultrassônico nos dois concretos estudados e este fato também foi relatado pela literatura (MALHOTRA; CARINO, 2004; VELAY-LIZANCOS *et al.*, 2018).

### **3.4 Resistividade elétrica superficial aparente (Re) e resistividade volumétrica (Rv)**

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados, respectivamente, os resultados médios dos ensaios de resistividade elétrica superficial aparente (Re) e resistividade elétrica volumétrica (Rv), obtidos nas idades de 1 a 28 dias, referentes aos concretos C25 e C45.

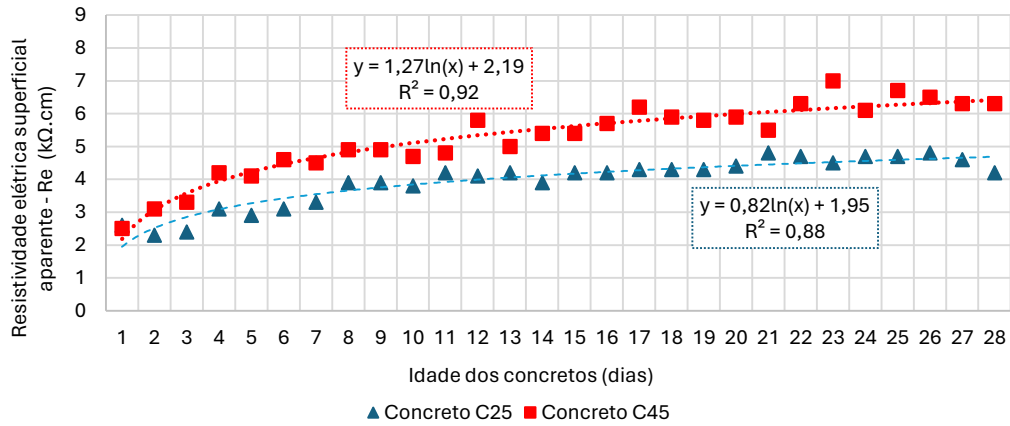
Conforme comentado em tópicos anteriores, as diferentes condições de porosidade e densificação da pasta de cimento hidratada existentes nos dois concretos em estudo promoveram essa diversificação nos resultados, principalmente na condição superficial. Acredita-se que essa menor diferença percentual, observada na resistividade volumétrica, deu-se pelo fato de que esta técnica (Rv) promove uma análise mais fidedigna da propriedade do material como um todo, pois minimiza a ação dos defeitos superficiais e considera também a interferência dos agregados (principalmente graúdos) nesta determinação.

Assim, como os dois concretos foram dosados com o mesmo consumo de agregados por metro cúbico de concreto, essa diferença percentual de cerca de 15% é basicamente em função das variáveis consumo de cimento, que é cerca de 15% menor no concreto C25 e relação a/c, que é 20% maior neste mesmo concreto. Se, todavia, o objetivo é avaliar as características do concreto de cobrimento, item essencial para a durabilidade da estrutura (notadamente quanto à questão dos riscos em relação à corrosão das armaduras), então a análise da resistividade elétrica aparente superficial ganha muita relevância.

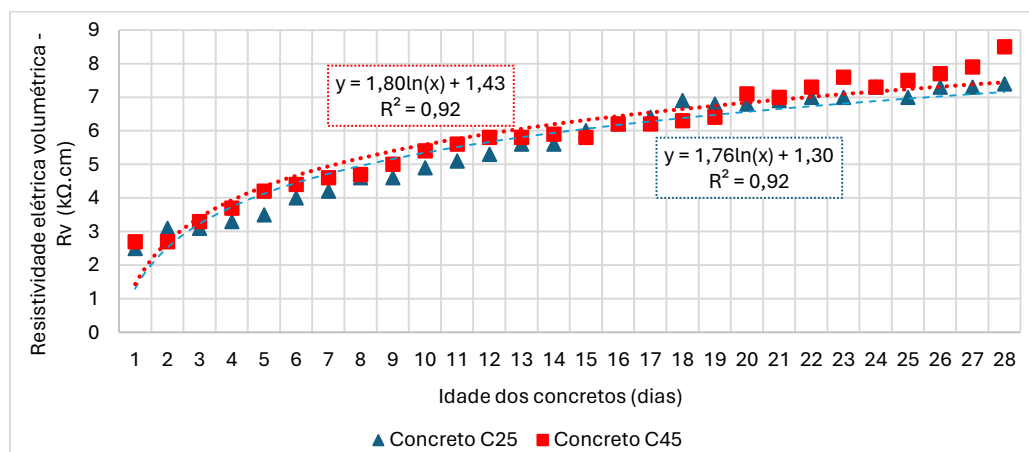
Por fim, a partir dos resultados obtidos, os concretos podem ser classificados aos 28 dias, sob o ponto de vista da durabilidade, como de alta probabilidade de ocorrência de corrosão das armaduras, muito embora os concretos não estejam contaminados por íons cloretos, mas apresentam valores em geral baixos de resistividade, de acordo com os

critérios propostos por Polder (2000), assim como pelos critérios de avaliação propostos pelo CEB 192 e apresentados por Cascudo (1997), Abreu (1998), Hoppe (2005) e Rosa (2005). Estes critérios ligam o grau de ionização da solução dos poros a probabilidade de corrosão (SILVA, 2016; OLIVEIRA; CASCUDO, 2018; CASCUDO *et al.*, 2021).

**Figura 6:** Evolução dos resultados médios de  $R_e$  ( $k\Omega.cm$ ) para os concretos C25 e C45 *versus* idade (dias).



**Figura 7:** Evolução dos resultados médios de  $R_v$  ( $k\Omega.cm$ ) para os concretos C25 e C45 *versus* idade (idade).



Estudos de Hoppe (2005) destacaram ainda a alta sensibilidade da técnica de resistividade em relação aos fatores intrínsecos de produção do concreto como relação água/ligante, consumo e tipo de cimento, quantidade e tipo de agregados, presença de aditivos químicos e adições minerais. Assim sendo, os resultados obtidos em relação à durabilidade dos concretos em análise frente à corrosão de armaduras denotam que, para a produção de estruturas em concreto mais duráveis, faz-se necessário um melhor estudo destes fatores, pois eles resultam em alterações no tamanho e distribuição dos poros, teor de umidade interna, pH, sensibilidade à cura, entre outros.

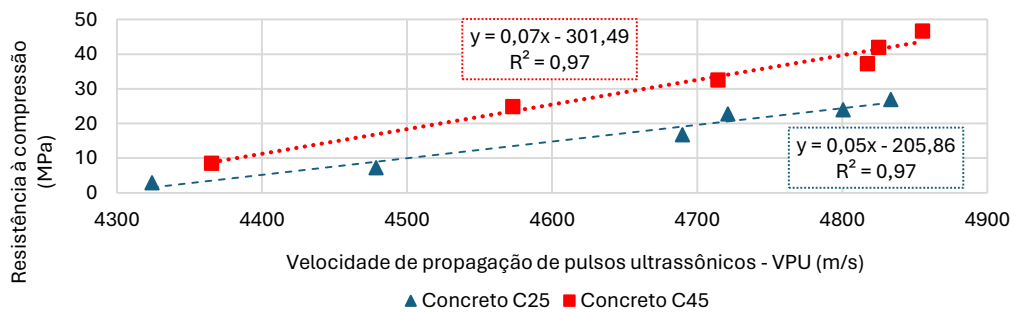
#### 4 Correlações e discussão geral

Destaca-se que os dados apresentados foram obtidos para apenas 2 tipos de concretos sem adições minerais. Ensaio adicionais com outros tipos de concreto, com adições minerais, com fibras, com porosidades diferentes e em idades mais avançadas são

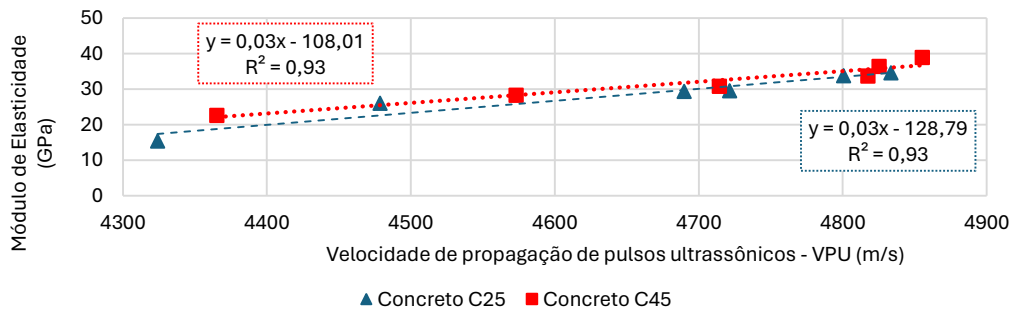
necessários para uma maior amostragem, representatividade dos ensaios, extrapolação e validação das correlações obtidas.

Assim, a partir dos resultados médios apresentados anteriormente realizou-se correlações dos dados de IE, VPU, Re e Rv com os dados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos com a finalidade de se prever, a partir de END, os principais parâmetros de resistência do concreto em suas primeiras idades. Os dados utilizados foram os resultados médios, obtidos dos concretos nas idades de 1 ou 3 dias até 28 dias. As curvas obtidas são apresentadas nas Figuras 8 a 11.

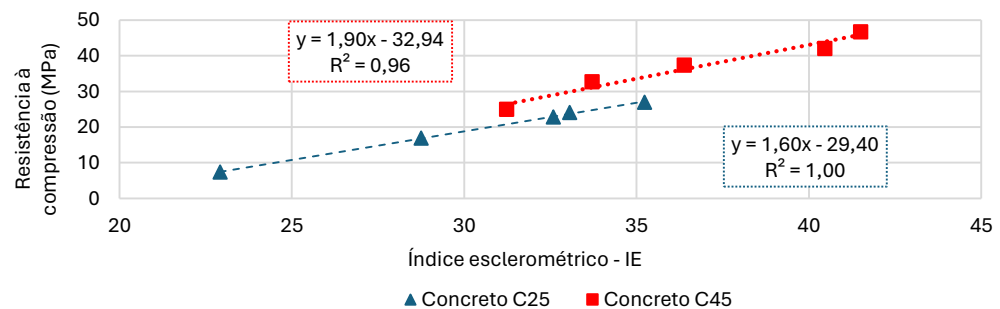
**Figura 8:** Correlação entre os valores de VPU e resistência à compressão dos concretos estudados nas idades de 1 a 28 dias.



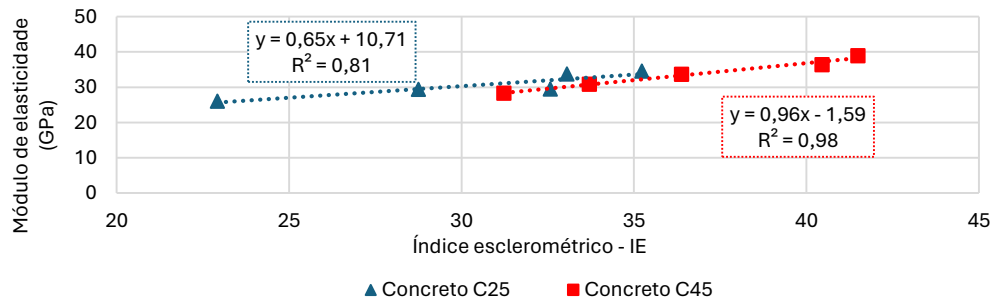
**Figura 9:** Correlação entre a VPU e o módulo de elasticidade dos concretos estudados nas idades de 1 a 28 dias.



**Figura 10:** Correlação entre o IE e a resistência à compressão dos concretos estudados nas idades de 3 a 28 dias.



**Figura 11:** Correlação entre o IE e módulo de elasticidade dos concretos estudados nas idades de 3 a 28 dias.



As curvas de correlação entre o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e os parâmetros de resistência mecânica (Figuras 8 e 9) apresentam bons coeficientes de determinação ( $R^2$ ), sendo de 0,97 para a resistência à compressão e 0,93 para o módulo de elasticidade nos dois concretos estudados. Esses dados corroboram a hipótese de que o ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU), principalmente a metodologia direta, pode ser um bom aliado para verificação de parâmetros de resistência e homogeneidade em elementos de concreto (ABNT, 2019), resguardadas as devidas considerações relacionadas à variabilidade inerente à execução do ensaio.

Na Figura 10, também são observados bons coeficientes de determinação entre IE e resistência à compressão, sendo  $R^2 = 1,00$  para C25 e  $R^2 = 0,96$  para C45. Nas primeiras idades ou quando se têm garantidas as condições reais das características de dureza superficial do concreto, nota-se que o ensaio de esclerometria pode estabelecer fortes correlações com a resistência à compressão do concreto.

Com relação ao parâmetro de módulo de elasticidade, todavia, observa-se o coeficiente de determinação da curva do concreto C25 menor que o do concreto C45 (0,81 e 0,98, respectivamente). Esta situação pode ser explicada em função da imprecisão da máquina de ensaio na aquisição dos baixos valores de aplicação de carga e deformação dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto C25 nas primeiras idades, conforme sinalizam os coeficientes de variação do módulo de elasticidade apresentados na Figura 3. Mesmo assim, a correlação ainda pode ser considerada boa para o C25.

A partir dos resultados apresentados dos concretos em análise, pode-se inferir que os END de IE e VPU apresentaram boas correlações com a resistência à compressão e módulo de elasticidade nos dois concretos analisados. Em geral, na literatura, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos com END para concretos sem adições são da ordem de 0,8 a 1,0 (MALHOTRA; CARINO, 2004; VELAY-LIZANCOS *et al.*, 2018; TRIPATHI *et al.*, 2022). Entretanto, é necessário observar que, na realidade, o concreto não é um material isotrópico. Logo, as curvas de correlação apresentadas devem ser utilizadas apenas para indicar uma tendência e não para se fazer o cálculo exato desses parâmetros de resistência à compressão.

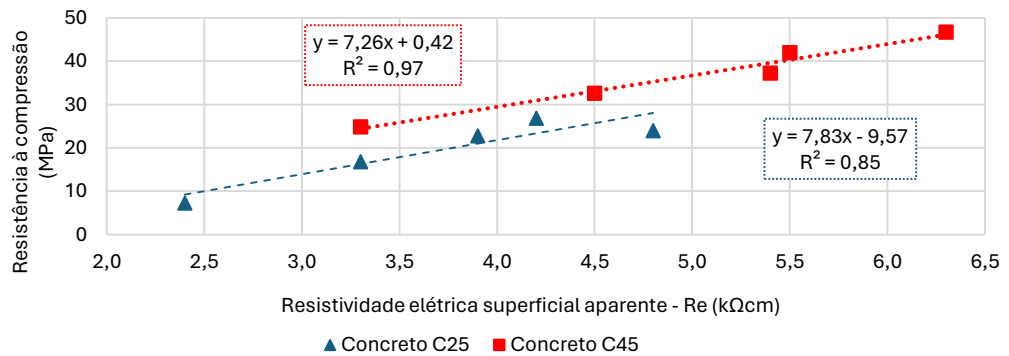
Ressalta-se que os parâmetros externos de degradação do concreto no meio em que ele está inserido também podem modificar suas condições superficiais e inferir em resultados falseados. Como exemplo, tem-se o fenômeno da carbonatação que altera a dureza superficial e fornece valores de IE mais elevados e acabam superestimando os valores de resistência à compressão obtidos por correlação. Nas Figuras 12 e 13 são

apresentados os resultados de correlação entre resistividade elétrica superficial e volumétrica com a resistência à compressão dos dois concretos estudados até a idade de 28 dias.

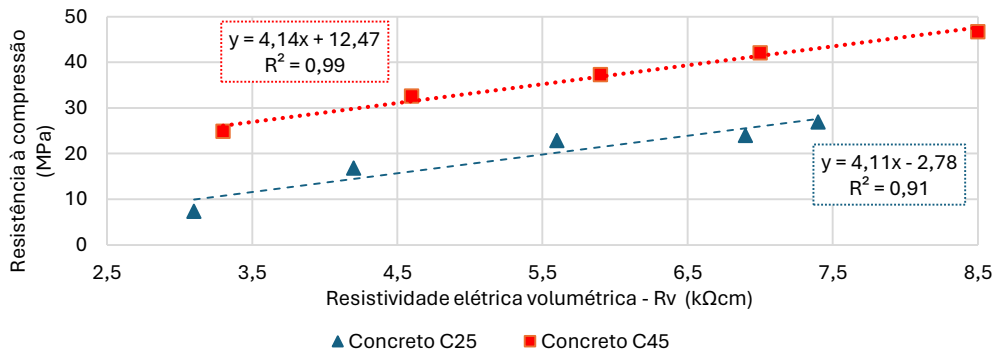
A partir das curvas de correlação de resistividade elétrica obtidas, observa-se coeficiente de determinação  $R^2$  maior entre resistência à compressão e  $R_v$  nos dois concretos. Isso se deve ao fato de que, no ensaio de  $R_v$ , a corrente elétrica gerada pelo transdutor passa por todo o corpo de prova em análise. Assim, os valores obtidos referem-se não só a uma porção superficial do concreto como na  $R_e$ , mas a todo o volume do corpo de prova analisado, obtendo assim valores mais fidedignos e que estabelecem melhor correlação com outras grandezas. Assim, em linhas gerais, nas correlações obtidas, obteve-se um melhor coeficiente de determinação  $R^2$  para resistividade elétrica volumétrica em relação à resistividade elétrica superficial.

Ademais, é muito pertinente que seja realizada essa mesma análise de correlações em idades de hidratação mais avançadas com a finalidade de identificar quais as idades críticas em que fenômenos como carbonatação, por exemplo, possam alterar as condições superficiais dos concretos e interferir nos resultados (CASCUDO, 1997; MALHOTRA; CARINO, 2004; CASCUDO; CARASEK, 2011; MEHTA, MONTEIRO, 2014; VELAY-LIZANCOS *et al.*, 2018). Por fim, na Figura 14 são apresentadas as correlações dos dados de VUP versus IE dos concretos C25 e C45 nas idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias.

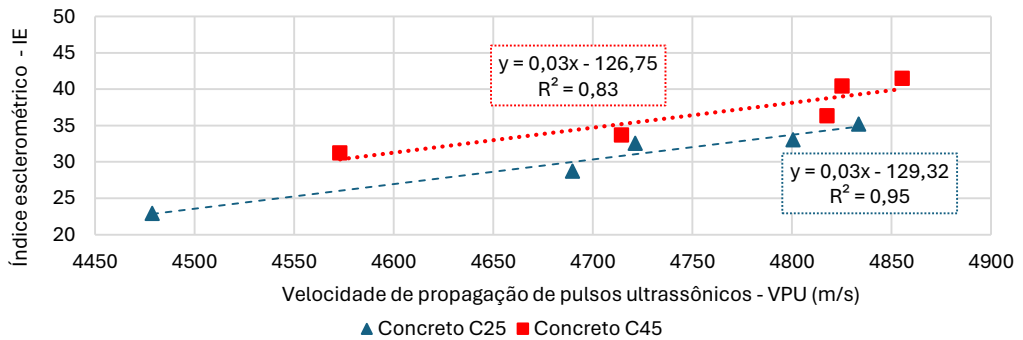
**Figura 12:** Correlação entre  $R_e$  e resistência à compressão de concretos C25 e C45 nas idades de 3 a 28 dias.



**Figura 13:** Correlação entre resistividade elétrica volumétrica e resistência à compressão de concretos C25 e C45 até 28 dias de idade.

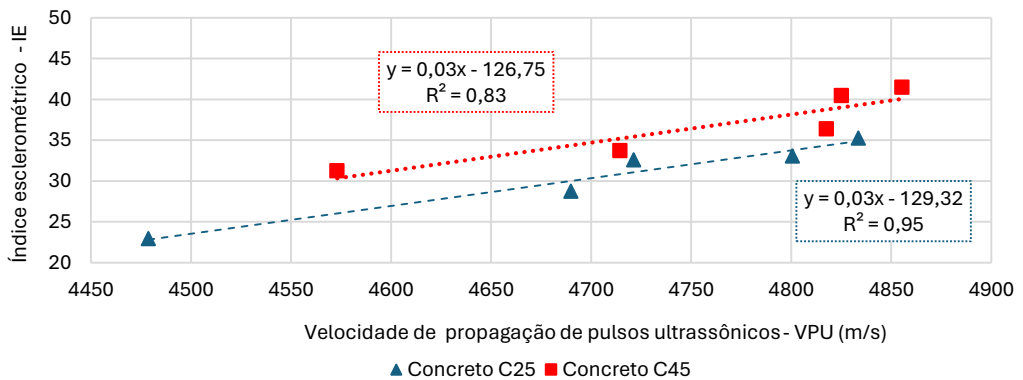


**Figura 14:** Correlação entre o IE e velocidade de propagação de onda ultrassônica dos concretos estudados nas idades de 1 a 28 dias.

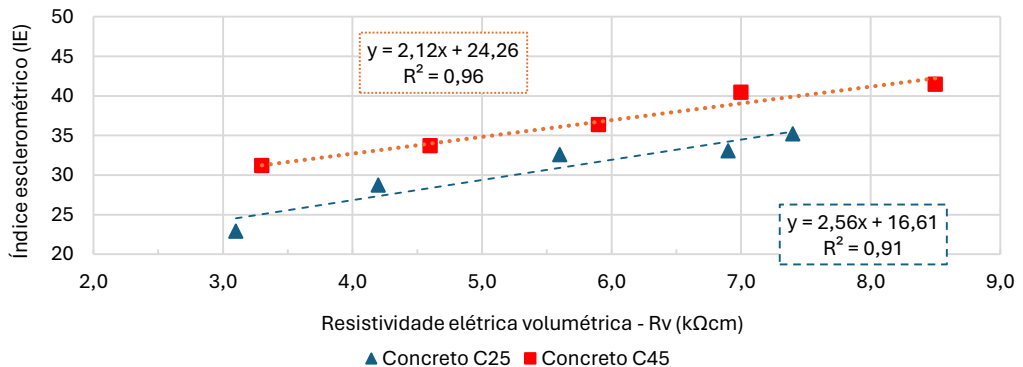


Notadamente, pode-se se dizer que as grandezas de IE e VPU medidas podem ser associadas entre si, uma vez que se obtiveram para o concreto C25, coeficientes de determinação  $R^2$  de 0,95 e, para o concreto C45,  $R^2$  de 0,83. Assim, uma grandeza poderá ser associada a outra em termos de critérios comparativos em situações em que se pretende avaliar características do concreto sob o ponto de vista qualitativo, como a homogeneidade, formação de lotes, detecção de falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras anomalias e monitoramento de variações do concreto, decorrentes do meio de agressividade em que está inserido (ABNT, 2015). Nas Figuras 15 a 19 são apresentadas as curvas de correlações obtidas entre as grandezas de  $R_e$ ,  $R_v$ , IE e VPU até a idade de 28 dias.

**Figura 15:** Correlação entre os valores obtidos de VPU e IE para os concretos estudados nas idades de 3 a 28 dias.

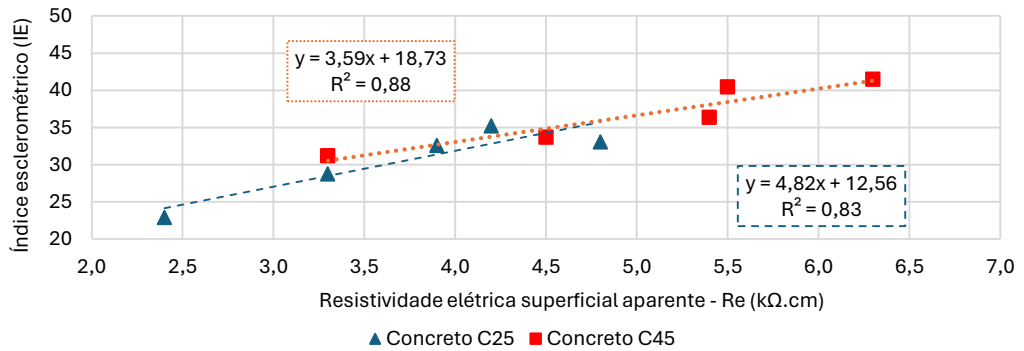


**Figura 16:** Correlação entre  $R_v$  e IE para os concretos estudados nas idades de 3 a 28 dias.

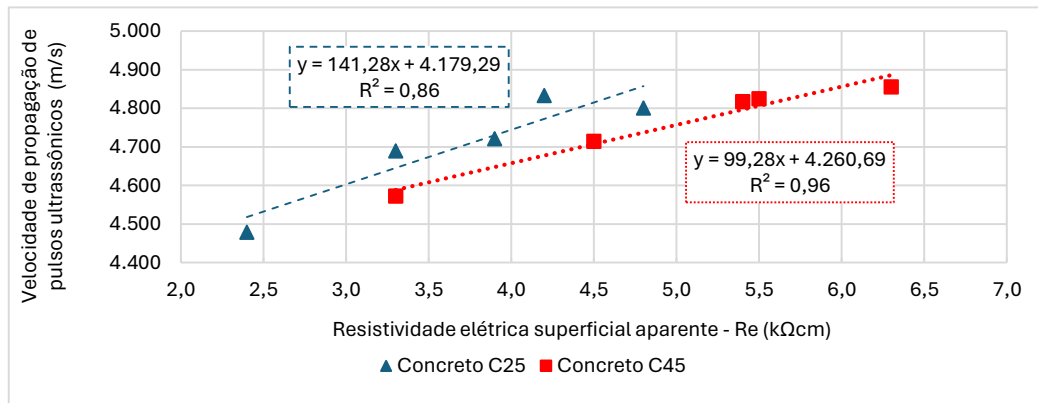




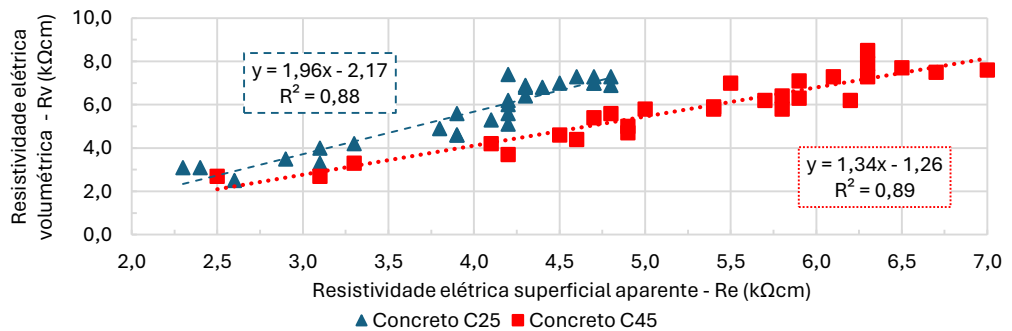
**Figura 17:** Correlação entre Re e IE para os concretos estudados nas idades de 3 a 28 dias.



**Figura 18:** Correlação entre Re e VPU para os concretos estudados nas idades de 1 a 28 dias.



**Figura 19:** Correlação entre Re e Rv para os concretos estudados nas idades de 1 a 28 dias.



Em geral, para as idades consideradas e para os concretos estudados, houve correlações acima de 0,83, sinalizando uma expressiva relação entre as propriedades consideradas. A tônica dos parâmetros analisados em maior ou menor escala, correlações significativas entre a resistividade elétrica do concreto e os dados de esclerometria e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foram construídos. Nesta linha, foram obtidos coeficientes de determinação -  $R^2$  iguais a 0,83 e 0,88 entre IE e Re e iguais a 0,91 e 0,96 entre IE e Rv, para C25 e C45, respectivamente. Essa mesma tendência foi observada para as técnicas de resistividade e VPU com  $R^2$  entre 0,85 e 0,96 entre a velocidade de pulso ultrassônico e os dados de resistividade (Re e Rv) para os dois concretos estudados.

Quando se analisou os dados de resistividade (*Re versus Rv*), verificou-se  $R^2$  iguais a 0,88 e 0,89 para os concretos C25 e C45, respectivamente. Essas correlações foram esperadas, uma vez que se trata da mesma técnica, com nuances diferentes.

Ao mesmo tempo, a correlação entre os dados de resistividade com os dados de resistência à compressão do concreto foi igualmente elevada. Isto demonstra o potencial da resistividade em capturar aspectos da microestrutura, defeitos e porosidade de concretos. A resistividade e o módulo de elasticidade resultaram em correlações também bem constituídas. A boa interação da resistividade com as propriedades mecânicas e elásticas do concreto ressalta, desde que se controle a umidade interna do material e que se tenha conhecimento do grau de ionização da solução do poro, a capacidade dessa técnica em aferir aspectos da microestrutura (mais ou menos densa), que por sua vez controlam a resistência e a rigidez dos concretos.

Em termos da correlação do IE e VPU com a resistência à compressão e módulo de elasticidade, as correlações foram muito significativas, com valores de  $R^2$  acima de 0,93. Essas conexões foram sempre muito boas, inclusive, nas primeiras idades, o que destaca a afinidade dessas medidas de END com as propriedades mecânicas e elásticas do concreto, como bem difundido na literatura científica.

De modo geral, as correlações da resistividade elétrica volumétrica (*Rv*) com os demais parâmetros foram sempre qualitativamente superiores às correlações da resistividade superficial (*Re*) com os mesmos parâmetros. Este resultado é bastante razoável, pois ao se aferir uma propriedade volumétrica, vários erros, incertezas ou incorreções presentes na camada superficial do concreto são minimizados, produzindo-se menos dispersão e variabilidade na comparação com uma medida essencialmente obtida na superfície. Este recorte do trabalho experimental é bastante coerente e condizente com a expectativa, mas convém ressaltar que a medida volumétrica nas inspeções somente se aplicaria em testemunhos extraídos, ao passo que a resistividade superficial tem aplicabilidade nos elementos da estrutura real (em campo) de forma absolutamente não destrutiva.

Sobre os modelos obtidos dos ajustes produzidos nas correlações, todos resultaram em ajustes lineares. Os modelos lineares, portanto, foram os que melhor representaram as relações entre todas as variáveis confrontadas na pesquisa experimental, traduzindo bem os comportamentos observados no âmbito das correlações produzidas.

Por fim, a Tabela 4 sumariza os valores de coeficientes de determinação obtidos entre as propriedades avaliadas para os concretos estudados. Para fins visuais, convencionou-se muito fortes correlações,  $R^2$  entre 0,95 e 1,00 (células em cor verde escuro), correlações fortes entre 0,90 e 0,95 (células em cor verde), correlações médias entre  $R^2$  de 0,85 e 0,89 e correlações mais fracas com  $R^2$  entre 0,80 e 0,84 (células em cor verde claro).

**Tabela 4:** Resumo dos resultados das correlações entre as propriedades avaliadas para os concretos estudados.

Propriedade avaliada	Re*	Rv**	Rc***	E****	Re	Rv	Rc***	E****
	Tipo de concreto /classe de resistência							
	C25				C45			
IE	0,83	0,91	1,00	0,81	0,88	0,96	0,96	0,98
VUP	0,86	0,85	0,97	0,93	0,96	0,88	0,97	0,93
Rv**	0,88	-	0,91	-	0,89	-	0,99	-
Re*	-	0,88	0,85	-	-	0,89	0,97	-

\*Re= resistividade elétrica

\*\* Rv resistividade volumétrica

\*\*\*Rc= resistência à compressão

\*\*\*\* E = módulo de elasticidade

## 5 Conclusões

Da pesquisa experimental realizada, foram observadas correlações significativas entre a resistividade elétrica do concreto e os dados de esclerometria e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Nas relações construídas, foram obtidos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) iguais a 0,83 e 0,88 entre IE e Re, e iguais a 0,91 e 0,96 entre IE e Rv, para C25 e C45, respectivamente.

Nessa mesma linha, elevados coeficientes de determinação foram obtidos nas relações entre as técnicas de resistividade e VPU. Assim,  $R^2$  entre 0,85 e 0,96 foram obtidos nas correlações entre a velocidade de pulso ultrassônico e os dados de resistividade (Re e Rv), nos dois concretos estudados.

Quando a relação entre os dois parâmetros de resistividade foi verificada (Re versus Rv), constataram-se  $R^2$  iguais a 0,88 e 0,89 para os concretos C25 e C45, respectivamente, julgando-se, portanto, como muito expressivas essas relações. Isto era esperado, uma vez que a essência das grandezas em confronto é a mesma, apenas com a nuance da análise na camada superficial do concreto contra a análise no concreto volumétrico.

A correlação dos parâmetros de resistividade com os dados de resistência à compressão do concreto foi, igualmente, elevada. Isto demonstra o potencial da resistividade em capturar aspectos da microestrutura e da porosidade de concretos. Os valores de  $R^2$  obtidos foram os seguintes, respectivamente para os concretos C25 e C45: 0,85 e 0,97 (relação de Re versus resistência à compressão) e 0,91 e 0,99 (relação de Rv versus resistência à compressão). Também a resistividade com o módulo de elasticidade resultou em correlações bem estabelecidas. A boa interação da resistividade com as propriedades mecânicas e elásticas do concreto ressalta, desde que se controle a umidade interna do material e que se tenha conhecimento do grau de ionização da solução do poro, a capacidade dessa técnica em aferir aspectos da microestrutura (mais ou menos densa) que, por sua vez, controlam a resistência e a rigidez dos concretos.

Em termos da correlação do IE e VPU com a resistência à compressão e módulo de elasticidade, as correlações foram muito significativas, com valores de  $R^2$  acima de 0,93. Essas correlações foram sempre muito boas, inclusive, nas primeiras idades, o que destaca a afinidade dessas medidas de END com as propriedades mecânicas e elásticas do concreto, como bem difundido na literatura científica.

De modo geral, as correlações da resistividade elétrica volumétrica (Rv) com os demais parâmetros foram sempre qualitativamente superiores às correlações da resistividade superficial (Re) com os mesmos parâmetros. Este resultado é bastante razoável, pois ao se aferir uma propriedade volumétrica, vários erros, incertezas ou incorreções presentes na camada superficial do concreto são minimizados, produzindo-se menos dispersão e variabilidade na comparação com uma medida essencialmente obtida na superfície. Este recorte do trabalho experimental é bastante coerente e condizente com a expectativa, mas convém ressaltar que a medida volumétrica nas inspeções somente se aplicaria em testemunhos extraídos, ao passo que a resistividade superficial tem aplicabilidade nos elementos da estrutura real, de forma absolutamente não destrutiva.

Sobre os modelos obtidos dos ajustes produzidos nas correlações, todos resultaram em ajustes lineares. Os modelos lineares, portanto, foram os que melhor representaram as

relações entre todas as variáveis confrontadas na pesquisa experimental, traduzindo bem os comportamentos observados nos âmbitos das correlações produzidas.

Com base em todo o programa experimental desenvolvido, pode-se afirmar que a resistividade elétrica é uma técnica muito interessante para uso complementar aos ENDS tradicionais (esclerometria e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas), no contexto das inspeções de campo. Isto se fundamenta na sensibilidade da técnica em face das variações do concreto e na ótima predisposição para se correlacionar com diversas outras técnicas e propriedades do concreto, além de aportar conteúdos relevantes no campo da durabilidade.

## Agradecimentos

Este trabalho faz parte do projeto de P&D - PD. 0394-1704-2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobrás FURNAS e FUNAPE/UFG/EECA/LABITECC.

## Referências

- ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. 1998. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.1R**: Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength. Detroit, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM G 57**: Standard test method field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method. West Conshohocken, United States of America: ASTM, 2020.
- ARAÚJO, E. C.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs, **Construction and Building Materials**, v. 324, p.126659, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126659>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584**: Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9204**: Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrico-volumétrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- BREYSSE, D.; KLYSZ, G. B.; DÉROBERT, C. X.; SIRIEIX, A. C.; LATASTE, A. J. F. How to combine several non-destructive techniques for a better assessment of concrete structures. **Cement and Concrete Research**, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.016>
- BREYSSE, D. Non-destructive 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103>
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 12504**: Part 4. Determination of ultrasonic pulse velocity. London, England: BSI, 2021.
- BROOMFIELD, J.P. **Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair**. New York: E&FN Spon, 1997.
- CAMARGO, M. V., FERRARI, V. J. Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END). **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 26, n. 03, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13047>
- CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 849-887, 2011.
- CASCUDO, OSWALDO; TEODORO, R.; OLIVEIRA, A. M. DE; CARASEK, H. Effect of Different Metakaolins on Chloride-Related Durability of Concrete. **ACI MATERIALS JOURNAL**, v. 118, p. 3-14, 2021. <https://doi.org/10.14359/51732634>
- CASCUDO, O. **O Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1 ed. São Paulo: PINI; Goiânia: Editora UFG, 1997.
- CHEYTANI, M.; CHAN, S.L.I. The applicability of the Wenner method for resistivity measurement of concrete in atmospheric conditions. **Case Studies In Construction Materials**, v. 15, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00663>
- CHUNG, K. L.; WANG L.; GHANNAM, M.; GUAN, K.; LUO, J. Prediction of concrete compressive strength based on early-age effective conductivity measurement. **Journal of Building Engineering**, v. 35, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101998>

- ELKHALDI, I.; ROZIERE, E.; TURCRY, P.; LOUKILI, A. Towards global indicator of durability performance and carbon footprint of clinker-slag-limestone cement-based concrete exposed to carbonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, p.134876,2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134876>
- GHODDOUSI, P.; SAADABADI, L. A. Study on hydration products by electrical resistivity for self-compacting concrete with silica fume and metakaolin. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 154, p. 219-228, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.178>
- GÓRA, J.; PIASTA, W. Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete. **Case Studies In Construction Materials**, v. 13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00438>
- HOPPE, T. **Resistividade elétrica do concreto contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- LAYSSI, H.; POURIA G.; ALIZADEH A. R.; SALEHI, M. Electrical Resistivity of Concrete. **Concrete International**. vol. 37. P. 41-46. 2015. Disponível em: [https://www.giatecscientific.com/wp-content/uploads/2015/05/Concrete\\_Electrical\\_Resistivity.pdf](https://www.giatecscientific.com/wp-content/uploads/2015/05/Concrete_Electrical_Resistivity.pdf)
- LEHNER, P.; HRABOVÁ, K. Relationship of Time-Dependent Parameters from Destructive and Non-Destructive Tests of Structural Concrete. **Mathematics**, 10, 460. 2022. <https://doi.org/10.3390/math10030460>
- LI, C.; JIAQI, L.; REN, Q.; ZHENG, Q.; JIANG, Z. Durability of concrete coupled with life cycle assessment: Review and perspective. **Cement and Concrete Composites**, v.139, p. 105041, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105041>
- LIM, M.K., CAO, H. Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 1310-1315, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.01.011>
- MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Nondestructive testing of concrete**. 2.ed. Florida – EUA: crcp, 2004. 310p.
- MARTINS, M.A.; BARROS, R. M.; SILVA, L. R. R.; SANTOS, V. C.; LINTZ, R.C.C.; GACHET, L.A.; MELO, M.L.; MARTINEZ, C.B. Durability indicators of high-strength self-compacting concrete with marble and granite wastes and waste foundry exhaust sand using electrochemical tests. **Construction and Building Materials**, v. 317, 125907, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125907>
- MATARUL, J.; MANNAN, M.A.; MOHAMMAD IBRAHIM SAFAWI, M.Z.; IBRAHIM, A.; JAINUDIN, N.A.; YUSUH, N.A. Performance-based Durability Indicators of Different Concrete Grades Made by the Local Ready Mixed Company: Preliminary Results. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 224, p. 620-625, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.452>
- MEDEIROS, M. H. F. D. **Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado**. N. 12. 2001. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

- MEDINA, C.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I.; THOMAS, C.; POLANCO, J.A.; FRÍAS, M. Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 480-486, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.176>
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. IBRACON, 2014.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. PORTO ALEGRE: Bookman, 2013. 448 p.
- OLIVEIRA, A.M.; CASCUDO, O. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 192, 2018, p. 467-477, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.100>
- PAN, J.; HE, J.; ZHU, J.; GAO, X. Theoretical and experimental study on the electrical resistivity method for evaluating fresh concrete segregation. **Journal of Building Engineering**, v. 48, p. 103943, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103943>
- PEDROSA, F.; ANDRADE, C. Spatial variability of concrete electrical resistivity and corrosion rate in laboratory conditions. **Construction and Building Materials**, v. 306, p. 124777, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124777>
- POLDER, R. B. Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC – 154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, v. 15, p. 125-131, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1)
- PROCEQ. **Manual RESIPOD**. 2017. Disponível em: [https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Resipod\\_Sales%20Flyer\\_Portuguese\\_high.pdf](https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Resipod_Sales%20Flyer_Portuguese_high.pdf). Acesso em: jun. 2022.
- RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; TUTIKIAN, B. F.; SOUZA, C. A.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; CASCUDO, O.; HELENE, P. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- ROSA, D.C. **Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFMS, Santa Maria, 2005.
- SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. **Construction and Building Materials**, v. 73, pp. 434–441, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>
- SILVA, L. M. A. **Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura**. 2016. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia GO, 2016.
- SILVA, M.T.A.; ROCHA, J.H.A.; MONTEIRO, E.C.B.; PÓVOAS, Y.V.; RABBANI, E.R.K. Avaliação do ensaio de ultrassom para a estimação da profundidade de fissuras em concreto. **Revista ALCONPAT**, v.9 (1), p. 79 – 92, 2019. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.289>

- TRIPATHI, D.; KUMAR, R.; MEHTA, P.K.; SINGH, A. Evaluation of a sustainable self-compacting concrete using destructive and non-destructive testing. **Materials Today: Proceedings**, v. 58, p. 830-835, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.389>
- TSIOULOU, 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.068>
- VELAY-LIZANCOS, M.; MARTINEZ-LAGE, I.; AZENHA, M.; GRANJA, J.; VAZQUEZ-BURGO, P. Concrete with fine and coarse recycled aggregates: e-modulus evolution, compressive strength and non-destructive testing at early ages. **Construction And Building Materials**, v. 193, p. 323-331, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.209>
- VIEIRA, A. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; CORDEIRO, G. C. Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete. **Construction And Building Materials**, v. 236, p. 117553, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117553>
- WALLY, G. B.; MAGALHÃES, F. C.; SILVA FILHO, L. C. From prescriptive to performance-based: An overview of international trends in specifying durable concretes, **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104359, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104359>