

**CENTRO UNIVERSITÁRIO
ANTÔNIO EUFRÁSIO DE TOLEDO DE PRESIDENTE PRUDENTE**

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO POR
ESCLEROMETRIA: ESTUDO COMPARATIVO COM ENSAIO AXIAL EM CORPOS
DE PROVA MOLDADOS EM LABORATÓRIO**

Lucas Gabriel Grigorio Cardozo

Presidente Prudente/SP
2025

**CENTRO UNIVERSITÁRIO
ANTÔNIO EUFRÁSIO DE TOLEDO DE PRESIDENTE PRUDENTE**

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO POR
ESCLEROMETRIA: ESTUDO COMPARATIVO COM ENSAIO AXIAL EM CORPOS
DE PROVA MOLDADOS EM LABORATÓRIO**

Lucas Gabriel Grigorio Cardozo

Trabalho de Curso apresentado como requisito parcial de Conclusão do Curso para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Me. Felipe Pires Chaves.

Presidente Prudente/SP
2025

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO POR
ESCLEROMETRIA: ESTUDO COMPARATIVO COM ENSAIO AXIAL EM CORPOS
DE PROVA MOLDADOS EM LABORATÓRIO**

Trabalho de Curso apresentado como requisito
parcial para obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Prof. Me. Felipe Pires Chaves
Orientador

Prof. Me. Roberto Kiyoshi Ito
Examinador

Prof. Dr. Elton Aparecido Prado dos Reis
Examinador

Presidente Prudente, 28 de novembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente à minha família, que sempre foi minha base e meu maior apoio. Cada palavra de incentivo, cada gesto de compreensão e toda a paciência demonstrada ao longo desta etapa foram essenciais para que eu conseguisse conciliar os estudos, o trabalho e a elaboração deste trabalho de conclusão de curso. A presença, mesmo nas pequenas coisas, fez toda a diferença e me deu força para seguir adiante, mesmo nos momentos de maior dificuldade.

Aos meus amigos, expresso minha sincera gratidão pela parceria e pelas inúmeras vezes em que compreenderam minhas ausências, limitações de tempo e dedicação quase exclusiva ao TCC. O apoio, as conversas e o companheirismo contribuíram significativamente para que eu mantivesse o foco e não desanimasse durante o processo.

Ao meu orientador, agradeço imensamente pela paciência, disponibilidade e pelo comprometimento em acompanhar cada etapa deste trabalho. Sua orientação técnica, suas observações criteriosas e sua capacidade de esclarecer dúvidas foram fundamentais para o aprimoramento da pesquisa e para o desenvolvimento de uma visão mais crítica e profissional. Sua contribuição foi decisiva para que este estudo alcançasse maturidade e qualidade.

Deixo também meus agradecimentos à banca examinadora, pela atenção dedicada à leitura, análise e avaliação deste trabalho. A consideração e o tempo disponibilizado, bem como as contribuições e sugestões apresentadas, representam uma etapa importante no meu crescimento acadêmico e profissional. A presença de cada integrante é motivo de honra e demonstra o compromisso com a formação e o desenvolvimento dos alunos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha trajetória. Seja por meio de palavras de apoio, de conselhos, de ajuda prática ou simplesmente acreditando no meu potencial, cada contribuição teve um papel essencial para que este objetivo fosse alcançado.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a correlação entre o ensaio de esclerometria e o ensaio de compressão axial em concretos convencionais moldados em laboratório. Foram produzidos corpos de prova com diferentes classes de resistência característica, correspondentes aos traços A, B e C, os quais foram submetidos à cura controlada e ensaiados à compressão e por esclerometria nas idades de 7, 14 e 28 dias. O estudo experimental foi conduzido conforme as normas técnicas brasileiras aplicáveis, utilizando esclerômetro digital e prensa hidráulica. Os resultados indicaram que, em todas as idades e traços analisados, as resistências obtidas apresentaram evolução de acordo com o comportamento esperado do concreto ao longo do tempo, evidenciando adequado processo de moldagem, adensamento e cura. De modo geral, observou-se tendência de crescimento simultâneo entre a resistência à compressão e os índices esclerométricos, revelando uma relação direta entre os dois métodos de avaliação. A análise estatística permitiu identificar padrões de correlação consistentes entre os ensaios destrutivo e não destrutivo do presente estudo, reforçando a aplicabilidade da esclerometria como ferramenta complementar no controle tecnológico do concreto. Assim, o estudo contribui para a compreensão do comportamento mecânico dos concretos avaliados e demonstra o potencial do ensaio esclerométrico para estimativa indireta de resistência em estruturas.

Palavras-chave: Concreto. Esclerometria. Resistência à compressão. Ensaio não destrutivo. Controle tecnológico.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the correlation between the rebound hammer test and the axial compressive strength test in conventional concrete specimens molded under controlled laboratory conditions. Concrete samples with different characteristic strength classes, corresponding to mixes A, B, and C, were produced, properly cured, and tested at 7, 14, and 28 days. All experimental procedures were carried out in accordance with the applicable Brazilian technical standards, using a digital rebound hammer and a hydraulic compression testing machine.

The results indicated a consistent development of mechanical strength for all mixes and ages, demonstrating adequate molding, compaction, and curing processes. Overall, a simultaneous increase was observed between compressive strength and rebound index values, revealing a direct and coherent relationship between both testing methods.

Statistical analysis confirmed the presence of consistent correlation patterns between destructive and non-destructive tests, reinforcing the applicability of the rebound hammer as a complementary tool for the technological control of concrete. Therefore, this study contributes to the understanding of the mechanical behavior of the evaluated concretes and highlights the potential of the rebound hammer test for indirect estimation of in situ strength.

Keywords: Concrete. Schmidt hammer. Compressive strength. Non-destructive test. Quality control.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

a/c – Relação água/cimento

CP – Corpo de Prova

C–S–H – Silicato de Cálcio Hidratado

CV – Coeficiente de Variação

END – Ensaio Não Destrutivo

fck – Feature Compression Know (Resistência característica à compressão do concreto)

LU – Código utilizado para identificação dos corpos de prova (Lucas)

MPa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NRMCA – National Ready Mixed Concrete Association

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E TABELAS

FIGURAS

FIGURA 1 - Visão Esquemática do uso de um esclerômetro (A – Instrumento pronto para o teste; B – Corpo impulsionado em direção ao objeto de teste; C – O martelo é solto; D – O martelo sofre reflexão).	21
FIGURA 2 - Moldagem dos corpos de prova.....	27
FIGURA 3 - Cura úmida dos corpos de prova em tanques.....	28
FIGURA 4 – Ensaio de esclerometria na superfície lateral do corpo de prova de concreto.....	30
FIGURA 5 – Ensaio de resistência à compressão utilizando prensa hidráulica	31
FIGURA 6 – Disco de elastômero amarelo	32
FIGURA 7 - Variação da resistência à compressão do traço A em MPa.....	38
FIGURA 8 - Variação da resistência à compressão do traço B em MPa.....	39
FIGURA 9 - Variação da resistência à compressão do traço C em MPa.....	40
FIGURA 10 - Variação do Índice Esclerométrico do traço A.....	44
FIGURA 11 - Variação do Índice Esclerométrico do traço B.....	45
FIGURA 12 - Variação do Índice Esclerométrico do traço C.....	46
FIGURA 13 - Variação do Índice Esclerométrico entre os traços	47
FIGURA 14 - Correlação entre a Resistência à Compressão Axial e o Índice Esclerométrico do Traço A.....	48
FIGURA 15 - Correlação entre a Resistência à Compressão Axial e o Índice Esclerométrico do Traço B.....	48
FIGURA 16 - Correlação entre a Resistência à Compressão Axial e o Índice Esclerométrico do Traço C.....	49
FIGURA 17 - Coeficiente de determinação R^2 do Traço A.....	51
FIGURA 18 - Coeficiente de determinação R^2 do Traço B.....	52
FIGURA 19 - Coeficiente de determinação R^2 do Traço C	53

TABELAS

TABELA 1 – Traços e proporções definidos	25
TABELA 2 - Resultados da resistência à compressão dos corpos de prova do traço A por idade de ensaio	35
TABELA 3 - Resultados da resistência à compressão dos corpos de prova do traço B por idade de ensaio	36
TABELA 4 - Resultados da resistência à compressão dos corpos de prova do traço C por idade de ensaio	36
TABELA 5 - Verificação do coeficiente de variação entre os corpos de prova de cada idade e traço.....	41

EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 - Desvio padrão	33
EQUAÇÃO 2 - Coeficiente de determinação.....	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	Concreto	15
2.2	Propriedades do Concreto e Ensaios Normativos	16
2.3	Resistencia à Compressão do Concreto	17
2.4	Ensaios Não Destrutivos em Concreto.....	19
2.5	Ensaio de Esclerometria.....	20
3	MÉTODOS EXPERIMENTAIS	23
3.1	Materiais	23
3.1.1	Cimento	23
3.1.2	Areia	23
3.1.3	Brita 1	24
3.1.4	Água	24
3.1.5	Equipamentos e Ferramentas Utilizadas	24
3.2	Dosagem e Preparação do Concreto	25
3.2.1	Dosagem do Concreto.....	25
3.2.2	Moldagem dos Corpos de Prova.....	25
3.2.3	Mistura e Homogeneização dos Materiais	27
3.2.4	Ensaio de Consistência (<i>slump test</i>).....	27
3.2.5	Cura dos Corpos de Prova.....	28
3.3	Ensaios Realizados	28
3.3.1	Ensaio de Esclerometria.....	29
3.3.2	Ensaio de Compressão Axial	31
3.4	Planejamento Experimental.....	32
3.4.1	Avaliação estatística.....	32
3.4.2	Procedimentos de Análise Estatística.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1	Resultados dos Ensaios de Compressão Axial.....	35
4.2	Resultados dos Ensaios de Esclerometria	43
4.3	Análise Comparativa entre os Ensaios.....	47
4.3.1	Avaliação da Correlação Linear por Meio do Coeficiente de Determinação (R^2)	50

5 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na engenharia civil, principalmente devido à sua versatilidade, durabilidade e facilidade de moldagem em diferentes formas e dimensões (Mehta; Monteiro, 2014). Entretanto, por se tratar de um material composto e heterogêneo, a sua resistência pode variar conforme os materiais empregados, o processo de dosagem, a cura e as condições de execução (Helene; Terzian, 1992). Dessa forma, torna-se essencial o controle tecnológico para garantir que o concreto atenda às propriedades exigidas em projeto, conforme estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2022).

No controle tecnológico do concreto, o ensaio de compressão axial é o método mais utilizado para a determinação da resistência característica (f_{ck}), sendo normalizado pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Apesar de sua alta precisão, esse ensaio é destrutivo e exige a moldagem e o rompimento dos corpos de prova, o que inviabiliza sua aplicação direta em estruturas já executadas. Assim, torna-se necessário o uso de métodos complementares que permitam avaliar o desempenho do concreto de forma não destrutiva, preservando a integridade do elemento analisado (Neville, 2011).

Entre os métodos não destrutivos aplicados ao concreto, destaca-se o ensaio de esclerometria, também conhecido como ensaio com esclerômetro de reflexão ou martelo de Schmidt, normalizado pela NBR 7584 (ABNT, 2012). Esse ensaio mede a dureza superficial do concreto a partir do índice de rebote do êmbolo, sendo um método simples, rápido e amplamente utilizado para avaliações em campo (Carino, 2001). Quando correlacionado ao ensaio de compressão axial, o índice esclerométrico pode fornecer estimativas confiáveis da resistência à compressão, desde que devidamente calibrado para o tipo de concreto avaliado (Helene; Pereira, 2003).

Diversos autores têm investigado a relação entre os resultados da esclerometria e da compressão axial, observando que fatores como o tipo de cimento, o tamanho dos agregados, a idade do concreto e as condições de cura influenciam significativamente essa correlação (Oliveira et al., 2018; Almeida Júnior et al., 2019; Souza, 2020). Dessa forma, a aplicação prática da esclerometria requer o desenvolvimento de equações de correlação específicas para cada tipo de concreto,

de modo a garantir resultados representativos e compatíveis com o método destrutivo de referência.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a correlação entre os resultados obtidos pelo ensaio de esclerometria e pelo ensaio de compressão axial em corpos de prova moldados em laboratório. Para isso, utilizou-se como referências concretos com resistências características de 20 MPa, 25 MPa e 30 MPa, ensaiados em idades de 7, 14 e 28 dias. O estudo busca contribuir para o aprimoramento das práticas de controle tecnológico, verificando a viabilidade da esclerometria como ferramenta complementar na estimativa da resistência do concreto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto

O concreto é, atualmente, o material de construção mais utilizado no mundo, por conta de suas características versáteis, como a disponibilidade dos materiais de sua composição, facilidade de moldagem, resistência mecânica e durabilidade. Seu uso na construção civil é amplamente adotado na execução de elementos estruturais, como lajes, vigas, pilares e fundações, os quais são responsáveis por resistir e transmitir os esforços atuantes nas edificações (Mehta; Monteiro, 2014).

No geral, o concreto é um compósito resultante da mistura do cimento Portland, agregados miúdos (areia), agregados graúdos (brita), água e, em alguns casos, aditivos químicos e adições minerais. No estado fresco, apresenta plasticidade suficiente para ser moldado em diferentes formas e, após o endurecimento, adquire resistência e estabilidade, tornando-se um material rígido e resistente (Helene; Terzian, 1992).

O cimento Portland, quando hidratado, reage com a água formando produtos responsáveis pela aderência e coesão do concreto, sendo os principais compostos hidratados os silicatos de cálcio hidratados (CSH) e hidróxido de cálcio (CH). Esses compostos são cruciais para a formação da resistência mecânica e da durabilidade do concreto (Mehta; Monteiro, 2014).

Os agregados, que compõem aproximadamente 70% a 80% de seu volume, possuem um papel essencial, não apenas por reduzir o consumo de cimento contribuindo para a sustentabilidade e economia, mas também por influenciar significativamente o seu desempenho. A granulometria, textura e resistência dos agregados impactam diretamente as propriedades mecânicas e a trabalhabilidade do concreto (Mehta; Monteiro, 2014).

A água tem uma dupla função, ela participa da hidratação do cimento e proporciona trabalhabilidade. A quantidade de água em relação ao cimento, expressa pela relação água/cimento, que é um dos fatores mais influentes na resistência do concreto. Relações água/cimento mais baixas tendem a produzir concretos de maiores resistências e menor porosidade, desde que mantida a adequada trabalhabilidade (Helene; Terzian, 1992).

Além destes materiais básicos, a indústria do concreto frequentemente utiliza aditivos químicos, como plastificantes, superplastificantes, retardadores de pega, aceleradores e incorporadores de ar, com o objetivo de ajustar as propriedades do concreto fresco e endurecido. Adições minerais, como sílica ativa, metacaulim, cinza volante e escória de alto-forno, também são utilizadas para melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade, além de contribuir para a sustentabilidade do material (Mehta; Monteiro, 2014).

Em relação às propriedades mecânicas, a resistência à compressão é a característica mais utilizada para controle e especificação do concreto. Contudo, outras propriedades como resistência à tração, módulo de elasticidade, absorção de água e durabilidade também são fundamentais, especialmente em ambientes agressivos.

O concreto pode ser classificado, segundo sua resistência à compressão, em concreto convencional (fck até 50 MPa), concreto de alta resistência (fck acima de 50 MPa) e, em casos especiais, concreto de ultra-alto desempenho, com fck superior a 100 MPa, com propriedades significativamente superior aos demais tipos de concreto, porém com maior custo e controle rigoroso na dosagem (Mehta; Monteiro, 2014).

2.2 Propriedades do Concreto e Ensaio Normativos

O desempenho do concreto depende diretamente de suas propriedades físicas e mecânicas, as quais são determinadas em diferentes idades e condições de exposição. Para garantir que essas propriedades estejam adequadas aos requisitos de projeto, a caracterização do concreto deve ser realizada por meio de diversos ensaios normatizados, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A NBR 12655 trata da elaboração, controle, recebimento e aceitação do concreto de cimento Portland e estabelece diretrizes fundamentais para o controle tecnológico do concreto (ABNT, 2022).

No estado fresco, propriedades como trabalhabilidade, massa específica, teor de ar incorporado, temperatura e tempo de pega são avaliadas conforme normas específicas. O ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test), por exemplo, é comumente utilizado para verificar a consistência do concreto no momento do lançamento, sendo regido pela NBR 16889 (ABNT, 2020).

No estado endurecido, a propriedade mais comumente monitorada é a resistência à compressão axial, por meio do ensaio normatizado pela NBR 5739 (ABNT, 2018), considerado referência tanto para o controle tecnológico quanto para a aceitação do concreto em obras. Outras propriedades também podem ser avaliadas, a depender do tipo de estrutura e das exigências de durabilidade, como a resistência à tração na flexão NBR 12142 (ABNT, 2010), o módulo de elasticidade estático NBR 8522 (ABNT, 2021), a absorção de água por imersão e o índice de vazios NBR 9778 (ABNT, 2009).

A norma NBR 12655 (ABNT, 2022) determina que o controle de resistência à compressão seja realizado por meio da moldagem de no mínimo dois corpos de prova cilíndricos por idade de ensaio. A média dos dois valores obtidos poderá ser utilizada para fins de aceitação, desde que ambos estejam dentro das tolerâncias estabelecidas.

Mesmo com essa flexibilização normativa, é comum que em práticas laboratoriais e pesquisas acadêmicas se mantenha a moldagem de três corpos de prova por idade, a fim de garantir maior segurança estatística, conforme diz Helene e Terzian (1992, p.56).

A realização adequada de cada ensaio normativo é indispensável, assegurando que o concreto produzido atenda aos parâmetros técnicos de desempenho, contribuindo para a durabilidade, a estabilidade estrutural e a confiabilidade das obras de engenharia (Mehta; Monteiro, 2014).

2.3 Resistência à Compressão do Concreto

A resistência à compressão é a propriedade mecânica mais utilizada para avaliar a qualidade do concreto, servindo como parâmetro essencial tanto para controle tecnológico quanto para verificação do atendimento aos requisitos de projeto. Este parâmetro está diretamente relacionado à capacidade do concreto de suportar esforços de compressão, sendo considerado um dos principais indicadores do desempenho estrutural do material na engenharia civil (Helene; Terzian, 1992).

O ensaio de compressão axial em corpos de prova cilíndricos é regulamentado pela norma, que estabelece os critérios para execução do procedimento. O método consiste na aplicação de uma carga crescente na direção longitudinal do corpo de prova até seu rompimento. A partir da máxima carga

registrada, calcula-se a tensão de ruptura, expressa em megapascal (MPa), considerando a área da seção transversal do corpo de prova. Este ensaio é reconhecido como o método mais confiável para determinar diretamente a resistência à compressão axial do concreto, devido à sua precisão e à robustez dos resultados obtidos, conforme estabelece a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Diversos fatores influenciam significativamente o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto. A relação água/cimento, conhecida como a/c , possui influência direta sobre a porosidade da matriz cimentícia e, conseqüentemente, sobre a resistência mecânica. Quanto menor essa relação, menor é o volume de poros e maior tende a ser a resistência, desde que sejam mantidas condições adequadas de trabalhabilidade e compactação (Mehta; Monteiro, 2014).

Além disso, a qualidade dos agregados utilizados na mistura também exerce forte impacto sobre o comportamento mecânico do concreto. Aspectos como a resistência individual dos agregados, sua granulometria, forma e textura superficial influenciam diretamente na aderência à pasta de cimento e na compactação da mistura (Helene; Terzian, 1992). Outros elementos importantes são o tipo de cimento empregado e a utilização de adições minerais, como a sílica ativa, o metacaulim e a cinza volante, que promovem reações pozolânicas capazes de melhorar tanto a resistência quanto a durabilidade do concreto (Mehta; Monteiro, 2014).

Outro aspecto fundamental é o processo de cura, uma vez que a hidratação dos compostos do cimento ocorre em meio aquoso. A ausência de umidade adequada durante os primeiros dias após a moldagem pode resultar em uma hidratação incompleta, comprometendo diretamente o desenvolvimento da resistência e da durabilidade do concreto (Neville, 2011). A resistência à compressão evolui com o tempo, sendo os 28 dias a idade padrão de referência para controle, mas a resistência continua a aumentar em ritmo menor após esse período, especialmente em concretos com adições minerais (Mehta; Monteiro, 2014).

O comportamento do concreto frente aos esforços de compressão é tipicamente caracterizado por uma fase inicial elástica linear, seguida por uma fase não linear até atingir o colapso. A ruptura ocorre, geralmente, de forma frágil e súbita, com formação de trincas internas, esmagamento da matriz cimentícia e perda de capacidade resistente. Este comportamento justifica a necessidade de realizar ensaios padronizados e em condições controladas, de modo que os resultados dos

rompimentos venham a garantir os resultados característicos com precisão (Helene; Terzian, 1992).

No contexto do controle tecnológico, a resistência à compressão obtida por meio do ensaio axial é utilizada como critério de aceitação do concreto. As dosagens são projetadas visando atingir uma resistência característica, denominada f_{ck} , que corresponde ao valor abaixo do qual se espera que no máximo 5% dos resultados possam estar, conforme previsto na norma NBR 6118 (ABNT, 2023).

Apesar do ensaio de compressão axial apresentar elevada precisão, trata-se de um método destrutivo, que exige a moldagem de corpos de prova específicos, além de tempo para cura e realização do ensaio. Por essa razão, a busca por métodos complementares, como os ensaios não destrutivos, tem sido cada vez mais frequente, principalmente para otimizar processos de controle tecnológico e avaliação de desempenho, sem, contudo, substituir a precisão dos resultados obtidos a partir do ensaio de compressão (Mehta; Monteiro, 2014).

2.4 Ensaios Não Destrutivos em Concreto

Os Ensaios Não Destrutivos (END) executados no concreto são métodos fundamentais para avaliação das propriedades de cada material sem comprometer sua integridade estrutural. Sua utilização se tornou indispensável nas atividades de controle de qualidade, principalmente quando se busca realizar diagnósticos rápidos e confiáveis sobre o desempenho do material em serviço. De acordo com Helene e Pereira (2003), esses ensaios são ferramentas eficazes na obtenção de informações que, muitas vezes, não podem ser acessadas por meio de métodos destrutivos, especialmente quando se busca preservar a funcionalidade da estrutura.

O desenvolvimento dos ensaios não destrutivos surgiu da necessidade de avaliar o concreto endurecido de maneira prática, segura e economicamente viável. Estes ensaios são amplamente empregados tanto em obras novas quanto em estruturas já existentes, possibilitando a detecção de anomalias, a verificação da consistência e aparência do concreto, a estimativa da resistência à compressão, bem como o monitoramento de processos de deterioração, como carbonatação e corrosão das armaduras (Carino, 2001).

Dentre os principais benefícios associados à aplicação dos ensaios não destrutivos estão a possibilidade de realizar inspeções in loco, a rapidez na obtenção

dos resultados, a redução dos custos operacionais e a não interferência na capacidade resistente dos elementos avaliados. Contudo, os Ensaios Não Destrutivos também apresentam limitações, uma vez que seus resultados estão diretamente ligados às condições superficiais do concreto, à umidade, ao estado de conservação da estrutura e, principalmente, à necessidade de calibração específica para o concreto da obra analisada. Sem essa calibração, a aplicação dos END pode conduzir a interpretações imprecisas ou equivocadas (Helene; Pereira, 2003).

Dentre os diversos métodos disponíveis, destacam-se aqueles mais difundidos na engenharia civil, como a esclerometria, ensaio esse que mede a dureza superficial por meio do índice de rebote; o ultrassom, utilizado para verificar a homogeneidade do material, a presença de fissuras ou vazios; e os ensaios eletromagnéticos, que permitem a detecção das armaduras e a medição do cobrimento de concreto. Também são utilizados métodos químicos, como a determinação da profundidade de carbonatação, que é crucial na verificação da durabilidade das estruturas (Carino, 2001).

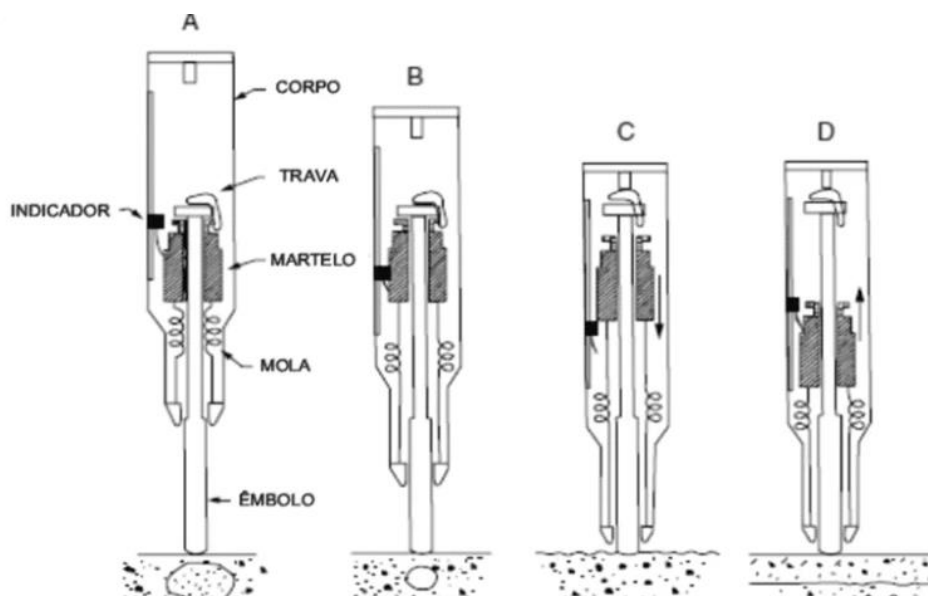
Embora sejam métodos eficientes, é imprescindível compreender que os ensaios não destrutivos, isoladamente, não fornecem uma medida absoluta da resistência à compressão. Eles devem ser utilizados como instrumentos complementares, associados, preferencialmente, a ensaios destrutivos ou a modelos de correlação estatística desenvolvidos especificamente para o tipo de concreto em análise e para as condições de exposição da estrutura. Dessa forma, segundo Carino (2001), o emprego adequado dos END se dá quando há uma integração entre a interpretação técnica dos resultados, o conhecimento do comportamento do concreto e a calibração dos equipamentos frente às características dos materiais avaliados.

2.5 Ensaio de Esclerometria

O ensaio de esclerometria, conhecido também como ensaio com esclerômetro de reflexão ou martelo de Schmidt, é um dos métodos não destrutivos mais empregados na avaliação do concreto endurecido, especialmente pela sua simplicidade operacional, baixo custo e agilidade na obtenção dos resultados. Conforme ilustrado na Figura 1, o equipamento consiste em um dispositivo portátil de impacto, dotado de mola calibrada e pistão metálico, projetado para medir a dureza superficial do concreto por meio do índice de rebote.

. Conforme estabelecido pela NBR 7584 (ABNT, 2012), a esclerometria consiste na medição do índice de rebote de um pistão metálico, que é lançado contra a superfície do concreto por meio da ação de uma mola calibrada.

FIGURA 1 - Visão Esquemática do uso de um esclerômetro (A – Instrumento pronto para o teste; B – Corpo impulsionado em direção ao objeto de teste; C – O martelo é solto; D – O martelo sofre reflexão).



Fonte: Malhotra e Carino, 2003.

O princípio de funcionamento do esclerômetro baseia-se na energia de impacto transferida do equipamento para o concreto. Parte dessa energia é absorvida pelo material, e a parte restante é convertida em movimento de recuo do pistão. Quanto maior a dureza da superfície do concreto, maior será o índice de rebote observado, indicando, indiretamente, maior resistência do material. Entretanto, é fundamental compreender que o resultado do ensaio reflete prioritariamente as condições superficiais do concreto, sendo, portanto, sensível a variáveis como carbonatação, umidade, textura e acabamento (Helene; Pereira, 2003).

Para a realização do ensaio, é indispensável que a superfície do concreto esteja livre de poeira, graxa, partículas soltas, pintura ou qualquer outro material que possa alterar o resultado. O equipamento deve ser posicionado perpendicularmente à superfície de ensaio, e recomenda-se que sejam realizados, no mínimo, doze impactos válidos por ponto, descartando-se o maior e o menor valores obtidos e calculando-se a média dos demais. Além disso, é necessário garantir um

afastamento mínimo de vinte e cinco milímetros das bordas, juntas ou descontinuidades, a fim de evitar leituras incorretas.

No contexto experimental, a utilização do esclerômetro em corpos de prova cilíndricos, como os de 100 mm × 200 mm, é uma prática frequentemente adotada em pesquisas acadêmicas, por permitir a obtenção de resultados em ambiente controlado, livre de interferências comuns às superfícies de elementos estruturais, como desgaste, fissuração e contaminação superficial (Oliveira et al., 2018). Apesar disso, os resultados devem ser analisados com cautela, pois refletem as condições do concreto no momento do ensaio e podem ser influenciados por fatores como a carbonatação superficial, conforme discutido por Helene e Pereira (2003).

O ensaio de esclerometria é, portanto, uma ferramenta valiosa para a análise e a avaliação da qualidade do concreto, especialmente quando integrado a outros métodos de ensaio, destrutivos ou não destrutivos (Carino, 2001). Entretanto, para que seus resultados sejam interpretados de forma correta, é imprescindível que estejam associados a modelos de correlação desenvolvidos para o tipo específico de concreto avaliado, bem como às condições ambientais e de exposição. Conforme destacado por Helene e Pereira (2003), seu uso isolado, sem a devida calibração, pode conduzir a diagnósticos imprecisos, comprometendo a confiabilidade da análise.

3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O presente capítulo descreve de forma detalhada os procedimentos experimentais adotados na pesquisa, contemplando as etapas de preparo dos materiais, moldagem dos corpos de prova, métodos de ensaio e planejamento experimental.

3.1 Materiais

A composição do concreto empregado nos ensaios foi definida com base no método de dosagem proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2020), adotando materiais amplamente utilizados na construção civil e disponíveis na região de Presidente Prudente/SP.

3.1.1 Cimento

Foi utilizado cimento Portland composto CP II-E 32, da marca Votoran, o qual contém adição de material pozolânico, contribuindo para uma hidratação mais uniforme e boa durabilidade do concreto, conforme descrito por Mehta e Monteiro (2014). A escolha desse tipo de cimento justifica-se por sua ampla utilização em obras de pequeno e médio porte e pela compatibilidade com os objetivos da pesquisa.

3.1.2 Areia

O agregado miúdo empregado consistiu em areia natural de rio, classificada como de granulometria média, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019). O material foi peneirado previamente para a remoção de impurezas e frações muito finas, garantindo melhor controle da composição granulométrica e da trabalhabilidade da mistura, em consonância com os critérios estabelecidos pela NBR 12655 (ABNT, 2022).

3.1.3 Brita 1

O agregado graúdo utilizado foi brita 1, de origem basáltica, com dimensões nominais entre 9,5 mm e 19 mm, conforme os limites especificados na NBR 7211 (ABNT, 2019). Este material foi selecionado pela sua elevada resistência e pela boa aderência à pasta de cimento, características fundamentais para o desempenho mecânico do concreto (Helene; Terzian, 1992).

3.1.4 Água

A água utilizada no amassamento e na cura dos corpos de prova foi potável, isenta de impurezas, atendendo às exigências da NBR 15900-1 (ABNT, 2009), que estabelece os requisitos para o uso de água em concreto. A utilização de água limpa assegura que não haja interferências químicas na reação de hidratação do cimento.

3.1.5 Equipamentos e Ferramentas Utilizadas

Para a execução dos ensaios e moldagem dos corpos de prova foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Kit Slump, conforme NBR 16889 (ABNT, 2020), para determinação da consistência do concreto fresco;
- Fôrmas metálicas cilíndricas com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, atendendo à NBR 5738 (ABNT, 2015);
- Esclerômetro digital, calibrado conforme as diretrizes da NBR 7584 (ABNT, 2012);
- Prensa hidráulica com capacidade de 95 toneladas, utilizada para o ensaio de compressão axial, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Todos os equipamentos foram previamente verificados e calibrados, garantindo a precisão dos resultados experimentais.

3.2 Dosagem e Preparação do Concreto

3.2.1 Dosagem do Concreto

A dosagem dos concretos foi realizada utilizando o método empírico desenvolvido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2020), amplamente empregado em estudos laboratoriais e no controle tecnológico de concretos convencionais. A partir dos três traços definidos conforme a Tabela 1.

TABELA 1 – Traços e proporções definidos

Traço	Proporções (Cimento, Areia Brita)	Relação a/c
A	1 : 2,33 : 3,12	0,56
B	1 : 1,69 : 2,03	0,475
C	1 : 1,45 : 1,95	0,44

Fonte: O autor.

Baseados em faixas de resistência características à compressão, nomeou-se os corpos de prova de 1 a 27 tendo as faixas de resistências representadas, 20 MPa representado pela letra A, 25 MPa pela letra B e 30 MPa com a letra C, que serviram como referência para o desenvolvimento experimental. Assim, os traços foram concebidos com foco nessas classes de resistência, funcionando como base comparativa para os ensaios realizados.

Cada traço foi elaborado com base nas proporções entre cimento, agregados e água, ajustadas para garantir consistência adequada e homogeneidade da mistura. O controle da relação água/cimento (a/c) foi realizado de modo a assegurar a trabalhabilidade necessária e a obtenção das resistências desejadas, conforme os princípios descritos por Helene e Terzian (1992) e Mehta e Monteiro (2014).

3.2.2 Moldagem dos Corpos de Prova

A moldagem dos corpos de prova foi conduzida conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015), que define as condições padronizadas para execução de amostras destinadas à avaliação da resistência do concreto. A

observância a essa norma é essencial para garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos em ensaios mecânicos.

Os moldes metálicos cilíndricos, com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, foram previamente limpos e lubrificados internamente, prevenindo a aderência do concreto e facilitando a desmoldagem. O preenchimento dos moldes foi realizado em duas camadas de igual volume, sendo cada uma adensada por 12 golpes uniformemente distribuídos com o auxílio de uma haste metálica padronizada, conforme o método descrito na norma NBR 5738 (ABNT, 2015). Esse processo visa eliminar o ar aprisionado e assegurar a compactação homogênea da mistura, evitando a formação de vazios internos que possam comprometer a resistência do concreto.

Após o adensamento da segunda camada, procedeu-se ao arrasamento superficial com o uso de régua metálica, garantindo o nivelamento da superfície e a obtenção da geometria adequada do corpo de prova. A correta execução dessas etapas é determinante para a representatividade dos resultados, visto que pequenas variações na moldagem podem afetar significativamente a resistência final do material (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2011).

De acordo com Helene e Terzian (1992), o rigor na moldagem e no adensamento está diretamente relacionado à uniformidade e à precisão dos ensaios, uma vez que a eliminação eficiente dos vazios e a homogeneidade da mistura são fatores decisivos para o desempenho mecânico do concreto. Assim, o processo de moldagem adotado neste estudo buscou reproduzir as condições ideais de compactação e acabamento superficial, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

A execução dos corpos de prova compreendeu a moldagem de 27 corpos de prova cilíndricos, realizada em laboratório de controle tecnológico de concreto que optou por não ter sua identificação divulgada, conforme mostra a Figura 2, divididos igualmente entre as três classes de resistência e idades de ensaio. Essa distribuição visa garantir a representatividade estatística dos resultados e permitir a elaboração de modelos de correlação robustos entre os métodos de ensaio, conforme recomendado por Oliveira et al. (2018) e Almeida Júnior et al. (2019).

FIGURA 2 - Moldagem dos corpos de prova

Fonte: O autor.

3.2.3 Mistura e Homogeneização dos Materiais

O processo de mistura foi executado manualmente dentro do carrinho de mão, iniciando-se com a homogeneização dos agregados miúdos e graúdos, seguida pela adição do cimento Portland, todos pesados devidamente com balança digital. Posteriormente, a água foi incorporada de forma gradual, até atingir a consistência adequada, conforme recomendado pela NBR 12655 (ABNT, 2022). O concreto foi misturado até a obtenção de uma massa homogênea, garantindo a distribuição uniforme dos componentes.

3.2.4 Ensaio de Consistência (*slump test*)

A verificação da consistência foi realizada pelo método do abatimento do tronco de cone, seguindo rigorosamente os procedimentos da NBR 16889 (ABNT, 2020). Esse ensaio tem como finalidade avaliar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, garantindo que o material apresente condições adequadas para moldagem e adensamento, conforme indicado por Neville (2011).

3.2.5 Cura dos Corpos de Prova

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura úmida em tanques com temperatura e saturadas de cal com controle de pH, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015) conforme Figura 3. O controle adequado das condições de cura é essencial para assegurar a continuidade das reações de hidratação e o desenvolvimento da resistência à compressão, conforme salientado por Neville (2011).

FIGURA 3 - Cura úmida dos corpos de prova em tanques



Fonte: O autor.

3.3 Ensaio Realizados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão axial e esclerometria, realizados conforme as normas NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 7584 (ABNT, 2012). As análises compreendem concretos com resistências características dos traços A, B e C, avaliados nas idades de 7, 14 e 28 dias.

O objetivo principal destes métodos é comparar o comportamento dos concretos ao longo do tempo de cura, verificando o desenvolvimento da resistência e

a relação entre os valores obtidos pelos dois métodos de ensaio. Para isso, os resultados individuais e médios foram organizados em tabelas e gráficos, possibilitando a análise visual da evolução da resistência e a correlação entre os parâmetros estudados.

Todos os corpos de prova foram moldados, curados e ensaiados conforme os procedimentos normativos, garantindo reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados. Os dados foram tabulados e analisados de forma comparativa, de modo a identificar tendências e possíveis variações associadas às propriedades do concreto, ao processo de moldagem e às condições de cura, conforme recomendado por Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2011).

3.3.1 Ensaio de Esclerometria

O ensaio de esclerometria foi conduzido de acordo com a NBR 7584 (ABNT, 2012), utilizando esclerômetro de reflexão digital (Esclerometro Silver Schmidt LIVE OS8200) da marca Proceq, devidamente calibrado. O procedimento consistiu na aplicação de impactos controlados na superfície lateral dos corpos de prova, previamente lixada e limpa, de modo a eliminar irregularidades superficiais que pudessem interferir nas leituras.

Em cada corpo de prova, foram realizados doze impactos válidos, descartando-se o maior e o menor valores e calculando-se a média dos dez restantes, conforme prescrito na norma. O equipamento foi posicionado perpendicularmente à superfície do corpo de prova, garantindo o correto alinhamento e a reprodutibilidade das medições conforme mostra a Figura 4.

FIGURA 4 – Ensaio de esclerometria na superfície lateral do corpo de prova de concreto



Fonte: O autor.

Os ensaios foram realizados nas idades de 7, 14 e 28 dias, nos mesmos corpos de prova posteriormente destinados ao rompimento por compressão axial, de forma a permitir a correlação direta entre o índice de rebote e a resistência à compressão. O procedimento experimental adotado segue recomendações de Helene e Pereira (2003) e Oliveira et al. (2018), que destacam a importância de calibrações específicas para cada tipo de concreto avaliado.

3.3.2 Ensaio de Compressão Axial

O ensaio de compressão axial foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando prensa hidráulica com capacidade nominal de 100 toneladas força da marca Solotest conforme Figura 5.

FIGURA 5 – Ensaio de resistência à compressão utilizando prensa hidráulica



Fonte: O autor.

E o capeamento realizado com discos de elastômero amarelo conforme mostra a Figura 6, os quais apresentam faixa de operação recomendada entre 2 e 80 MPa, alta elasticidade e baixa deformação permanente, características adequadas para garantir distribuição uniforme de tensões durante o ensaio (ADITEC, 2023). Ressalta-se que, embora esses discos sejam amplamente utilizados em laboratórios de controle tecnológico, a NBR 5738 (ABNT, 2021) não menciona elastômeros como material específico de capeamento, limitando-se a estabelecer requisitos gerais como espessura máxima de 3 mm, superfície lisa, boa aderência e resistência compatível com a do concreto. O ensaio consistiu na aplicação de carga axial crescente até o rompimento dos corpos de prova, sendo registrada a carga máxima suportada por cada amostra.

FIGURA 6 – Disco de elastômero amarelo



Fonte: O autor.

A resistência à compressão foi obtida pela relação entre a carga máxima aplicada e a área da seção transversal do corpo de prova, expressa em Megapascal (MPa).

Este ensaio, conforme Mehta e Monteiro (2014) e Helene e Terzian (1992), é considerado o método mais confiável para a determinação da resistência mecânica do concreto, servindo como referência para a calibração dos métodos não destrutivos e validação das equações de correlação desenvolvidas nesta pesquisa.

3.4 Planejamento Experimental

3.4.1 Avaliação estatística

A partir da NBR 12655 (ABNT, 2022) a análise estatística dos resultados de resistência à compressão foi conduzida com o objetivo de avaliar a uniformidade e a confiabilidade dos valores obtidos para cada grupo de corpos de prova. Para isso, foi calculado o coeficiente de variação (CV), parâmetro amplamente utilizado no controle tecnológico do concreto e definido pela relação entre o desvio padrão e a resistência média do conjunto de amostras.

O desvio padrão foi determinado a partir da Equação 2.

EQUAÇÃO 1 - Desvio padrão

$$DP_{amostral} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Onde:

$DP_{amostral}$ = desvio padrão amostral das resistências dos corpos de prova

i = índice do somatório

n = tamanho da amostra

x_i = valor individual da resistência à compressão do i -ésimo corpo de prova

\bar{x} = média aritmética das resistências dos corpos de prova do mesmo lote

N = número total de corpos de prova ensaiados na amostra

Esse mesmo critério é adotado por diversos autores e laboratórios de controle tecnológico, que destacam o coeficiente de variação como um parâmetro estatístico essencial para validar a representatividade dos ensaios de compressão (Mehta; Monteiro, 2014; Helente; Terzian, 1992). Estudos recentes, como os de Leal Júnior et al. (2023), também reforçam a importância da análise estatística na interpretação dos resultados de resistência, evidenciando que variações reduzidas entre corpos de prova estão diretamente relacionadas à qualidade da dosagem, do adensamento e das condições de cura.

Dessa forma, a avaliação do coeficiente de variação neste estudo foi utilizada como ferramenta complementar de análise, assegurando que os resultados obtidos apresentassem coerência interna e refletissem de maneira fidedigna o comportamento real dos concretos produzidos.

3.4.2 Procedimentos de Análise Estatística

Os dados obtidos dos ensaios de esclerometria e compressão axial foram submetidos a análises estatísticas de correlação e regressão, com o objetivo de identificar a relação entre o índice esclerométrico médio e a resistência à compressão axial. As análises contemplam modelos lineares e não lineares, avaliando o

coeficiente de determinação (R^2) e a significância estatística dos resultados, conforme metodologia empregada em estudos semelhantes (Souza, 2020; Oliveira et al., 2018).

Esse coeficiente é amplamente utilizado em análises de regressão para avaliar o quanto as variações observadas em uma variável dependente podem ser explicadas pela variação da variável independente (Montgomery; Runger, 2014).

O coeficiente de determinação (R^2) foi calculado por meio da relação entre a soma dos quadrados dos resíduos e a soma total dos quadrados. O valor de R^2 é obtido pela Equação 2.

EQUAÇÃO 2 - Coeficiente de determinação

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}}$$

Onde:

R^2 = coeficiente de determinação

SQ_{res} = soma dos quadrados dos resíduos

SQ_{tot} = soma dos quadrados total

Em outras palavras, o coeficiente de determinação expressa a proporção da variação total dos resultados experimentais que é explicada pelo modelo ajustado, sendo um indicador do grau de correlação entre as variáveis analisadas (Montgomery; Runger, 2014).

Valores de R^2 próximos a 1 indicam uma forte correlação entre as variáveis analisadas, sugerindo que o modelo proposto explica grande parte da variabilidade dos resultados. Já valores mais baixos de R^2 apontam uma menor relação entre as variáveis, indicando maior dispersão dos resultados (Hair et al., 2009).

Neste trabalho, o coeficiente de determinação foi obtido a partir da relação entre o índice esclerométrico médio e a resistência média à compressão axial para cada traço A, B e C, considerando as idades de 7, 14 e 28 dias. Dessa forma, foi possível avaliar a qualidade do ajuste entre os dados experimentais e o comportamento teórico esperado do concreto, conforme descrito por Neville (2011) e Almeida Júnior et al. (2019).

A interpretação dos valores de R^2 permitirá verificar a confiabilidade da correlação estabelecida entre os ensaios, contribuindo para a validação da esclerometria como método não destrutivo complementar no controle tecnológico do concreto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados dos Ensaio de Compressão Axial

O ensaio de compressão axial foi realizado com o objetivo de determinar a resistência mecânica dos concretos em diferentes idades de cura. Esse ensaio é considerado o mais representativo para o controle tecnológico do concreto, servindo de referência para o dimensionamento e para a calibração de métodos não destrutivos (Helene; Terzian, 1992). Nas tabelas apresentadas a seguir, encontram-se os resultados individuais de resistência à compressão expressos em MPa obtida pela razão da força em (tf) pela área quadrada da face superior dos cilindros. A Tabela apresenta os resultados referentes ao Traço A, a Tabela 3 **TABELA 3** corresponde ao Traço B, e a Tabela 4 reúne os resultados obtidos para o Traço C, permitindo a comparação do comportamento entre as três composições de concreto analisadas.

TABELA 2 - Resultados da resistência à compressão dos corpos de prova do traço A por idade de ensaio

Nº do CP	Idade	Resultado (tf)	Resultado MPa
LU - 1A	7	18,83	23,98
LU - 2A	7	18,20	23,17
LU - 3A	7	20,08	25,57
LU - 4A	14	22,16	28,21
LU - 5A	14	29,94	38,12
LU - 6A	14	27,56	35,09
LU - 7A	28	28,31	36,05
LU - 8A	28	30,99	39,46
LU - 9A	28	34,40	43,80

Fonte: O autor.

TABELA 3 - Resultados da resistência à compressão dos corpos de prova do traço B por idade de ensaio

Nº do CP	Idade	Resultado (tf)	Resultado MPa
LU - 10B	7	24,37	31,03
LU - 11B	7	26,09	33,22
LU - 12B	7	23,85	30,37
LU - 13B	14	29,59	37,68
LU - 14B	14	28,16	35,86
LU - 15B	14	28,54	36,34
LU - 16B	28	32,60	41,51
LU - 17B	28	33,46	42,60
LU - 18B	28	32,11	40,88

Fonte: O autor.

TABELA 4 - Resultados da resistência à compressão dos corpos de prova do traço C por idade de ensaio

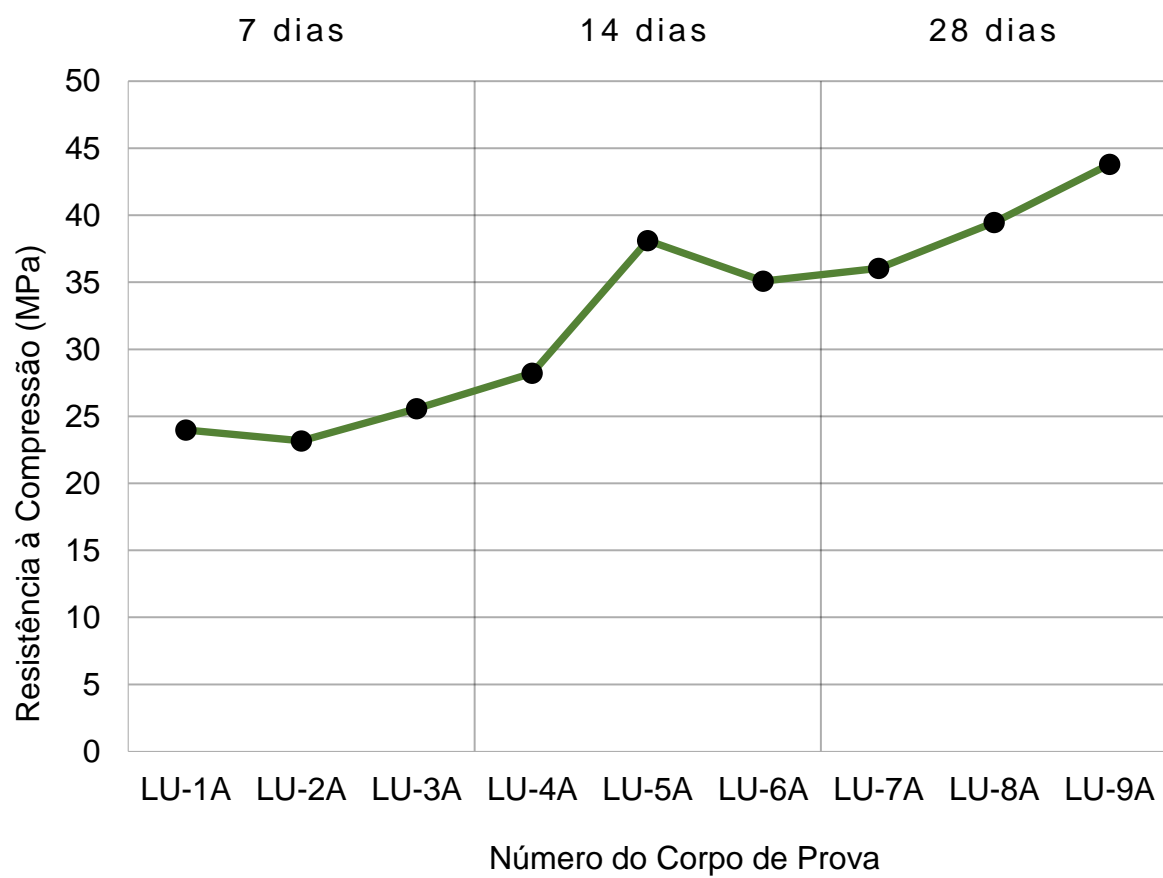
Nº do CP	Idade	Resultado (tf)	Resultado MPa
LU - 19C	7	20,97	26,70
LU - 20C	7	26,40	33,61
LU - 21C	7	23,28	29,64
LU - 22C	14	29,56	37,64
LU - 23C	14	29,62	37,71
LU - 24C	14	30,83	39,25
LU - 25C	28	31,28	39,83
LU - 26C	28	28,62	36,44
LU - 27C	28	34,74	44,23

Fonte: O autor.

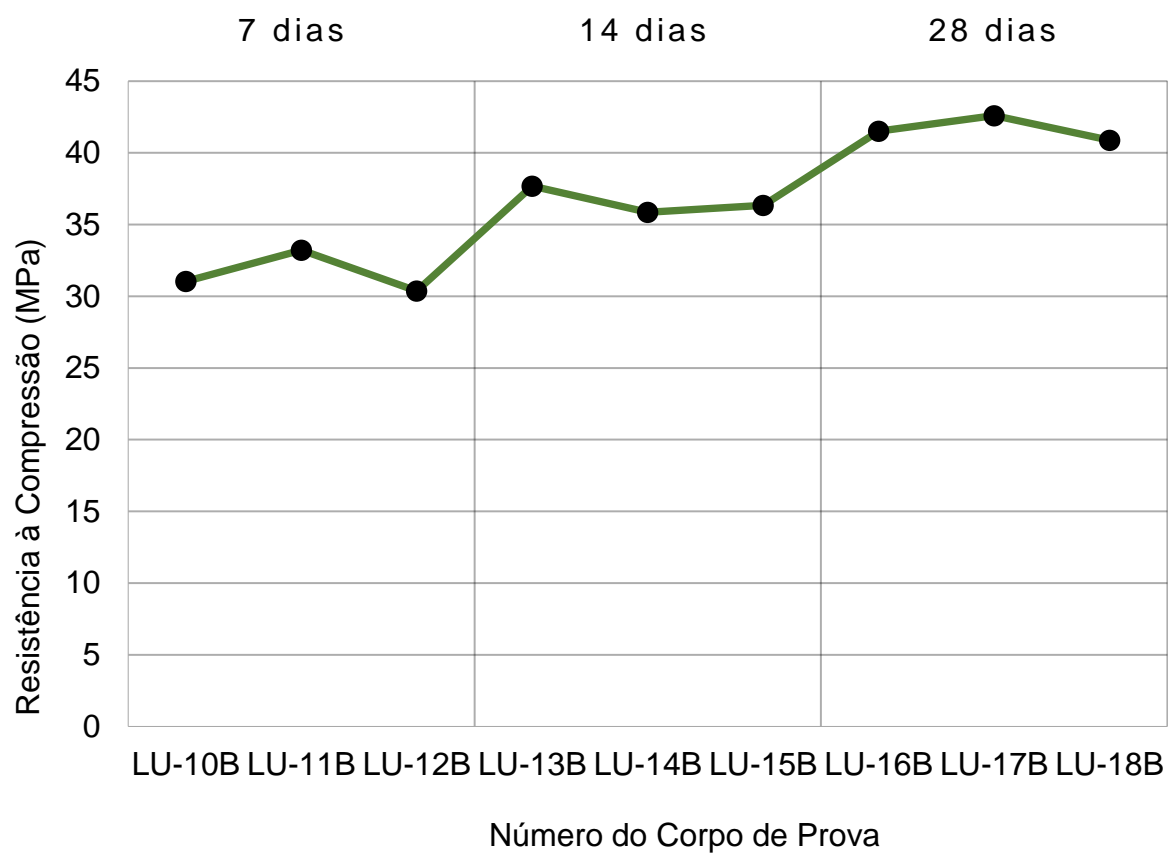
A análise dos resultados evidencia o comportamento característico de ganho progressivo de resistência com o avanço da idade do concreto, resultado do contínuo processo de hidratação do cimento e da formação dos compostos C–S–H, responsáveis pela rigidez e coesão da matriz cimentícia (Mehta; Monteiro, 2014). De modo geral, observou-se incremento significativo de resistência ao longo do tempo de cura, o que demonstra a eficiência do processo de moldagem, o controle da relação água/cimento e a adequação das condições de cura úmida empregadas.

Constatou-se que os valores obtidos superaram as faixas de referência inicialmente definidas, comportamento também relatado em estudos similares. Leal Júnior et al. (2023) observaram acréscimos de cerca de 18% na resistência média de concretos submetidos à cura por imersão, enquanto trabalhos divulgados no ResearchGate (2022) registraram ganhos próximos de 20% em misturas executadas sob rigoroso controle de materiais e adensamento. A NRMCA (National Ready Mixed Concrete Association, 2020) também descreve casos de resistências médias superiores às projetadas, associadas à utilização de dosagens mais conservadoras e à qualidade dos insumos.

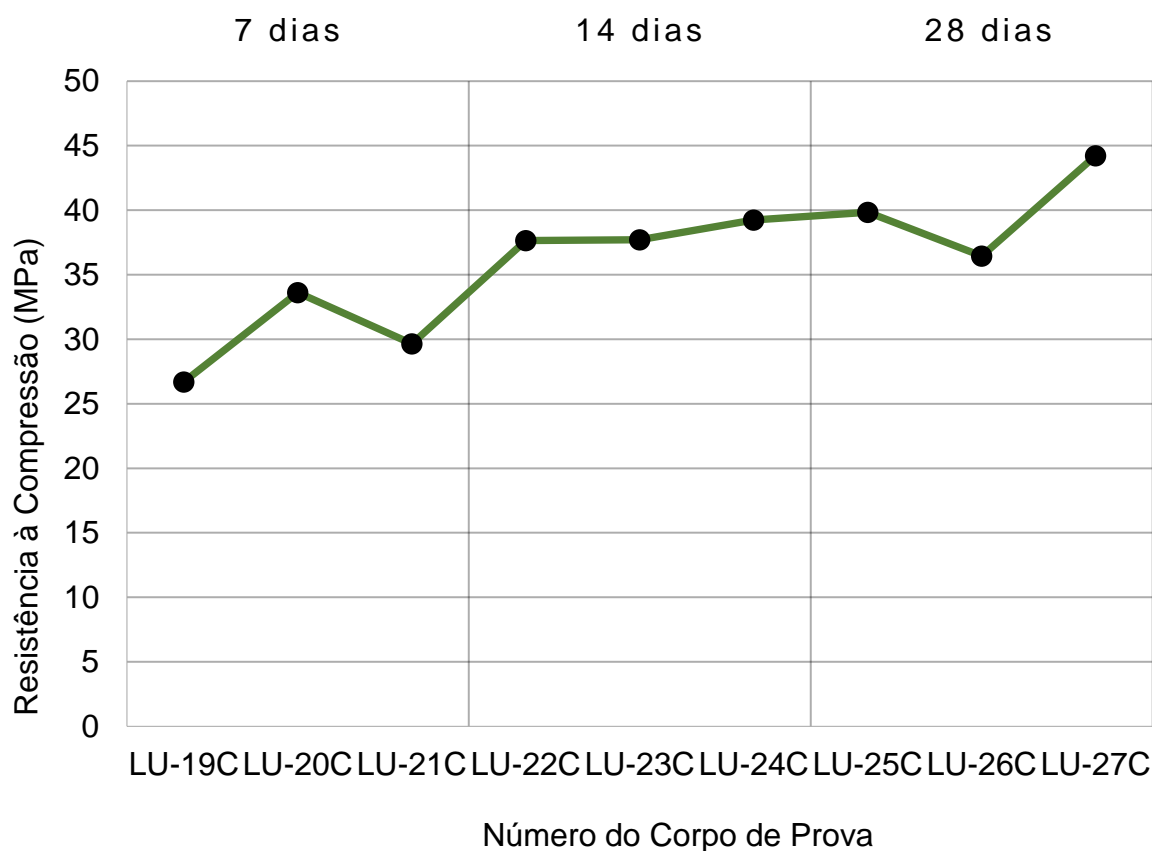
Esses resultados confirmam que o desempenho obtido está dentro do comportamento esperado para concretos produzidos sob condições laboratoriais controladas, nas quais a execução adequada e a uniformidade do material favorecem resistências médias superiores às estimadas em projeto. Tal fenômeno reforça a importância da calibração local dos ensaios e valida a confiabilidade dos procedimentos adotados. Dessa forma, também se observa a evolução da resistência de cada traço ao longo das idades de 7, 14 e 28 dias de cura, conforme apresentado, respectivamente, nas Figuras 7, 8 e 9.

FIGURA 7 - Variação da resistência à compressão do traço A em MPa

Fonte: O autor.

FIGURA 8 - Variação da resistência à compressão do traço B em MPa

Fonte: O autor.

FIGURA 9 - Variação da resistência à compressão do traço C em MPa

Fonte: O autor.

Nota-se também que a variação entre os corpos de prova de um mesmo fck por exemplo o traço C com 14 dias, com a resistência em MPa dentre os corpos de prova foi de (37,4; 37,71 e 39,25 MPa), obtendo resultados com valores da resistência próximos, demonstrando boa homogeneização do traço e controle de execução. A regularidade observada reforça a confiabilidade dos ensaios e a precisão dos resultados obtidos, de acordo com as boas práticas descritas na NBR 5738 (ABNT, 2015) e NBR 12655 (ABNT, 2022).

De acordo com o critério de avaliação da NBR 5739 (ABNT, 2018), concretos com coeficiente de variação inferior ou igual a 3% são classificados como de excelente uniformidade, enquanto valores entre 3% a 4% indicam uniformidade muito bom, 4 a 5% para bom, 5 a 6% para razoável e acima de 6% para deficiente. Com base nesses parâmetros, o coeficiente de variação foi determinado a partir da relação entre o desvio padrão e a resistência média de cada grupo de corpos de prova, permitindo avaliar a homogeneidade do concreto produzido, conforme apresentado na Tabela 5.

TABELA 5 - Verificação do coeficiente de variação entre os corpos de prova de cada idade e traço

Traço	Nº do CP	Idade de Ensaio	Resistência (MPa)	Coeficiente de Variação	Avaliação
A	LU - 1A	7	23,98	1,9	Excelente
A	LU - 2A	7	23,17	1,9	Excelente
A	LU - 3A	7	25,57	1,9	Excelente
A	LU - 4A	14	28,21	5,8	Razoável
A	LU - 5A	14	38,12	5,8	Razoável
A	LU - 6A	14	35,09	5,8	Razoável
A	LU - 7A	28	36,05	3,8	Muito bom
A	LU - 8A	28	39,46	3,8	Muito bom
A	LU - 9A	28	43,80	3,8	Muito bom
B	LU - 10B	7	31,03	1,8	Excelente
B	LU - 11B	7	33,22	1,8	Excelente
B	LU - 12B	7	30,37	1,8	Excelente
B	LU - 13B	14	37,68	1,0	Excelente
B	LU - 14B	14	35,86	1,0	Excelente
B	LU - 15B	14	36,34	1,0	Excelente
B	LU - 16B	28	41,51	0,8	Excelente
B	LU - 17B	28	42,60	0,8	Excelente
B	LU - 18B	28	40,88	0,8	Excelente
C	LU - 19C	7	26,70	4,5	Bom
C	LU - 20C	7	33,61	4,5	Bom
C	LU - 21C	7	29,64	4,5	Bom
C	LU - 22C	14	37,64	0,8	Excelente
C	LU - 23C	14	37,71	0,8	Excelente
C	LU - 24C	14	39,25	0,8	Excelente

Traço	Nº do CP	Idade de Ensaio	Resistência (MPa)	Coefficiente de Variação	Avaliação
C	LU - 25C	28	39,83	3,8	Muito bom
C	LU - 26C	28	36,44	3,8	Muito bom
C	LU - 27C	28	44,23	3,8	Muito bom

Fonte: O autor.

De forma geral, os resultados demonstram compatibilidade entre o fck de projeto e os valores obtidos experimentalmente, confirmando que os concretos atenderam às resistências de referência previstas conforme indica a média da Tabela 6. Além disso, a evolução linear da resistência com o tempo reforça o adequado desempenho do cimento CP II-E utilizado, cuja hidratação tende a apresentar bom desenvolvimento até 28 dias (Helene; Terzian, 1992; Mehta; Monteiro, 2014).

TABELA 6 – Resistência à compressão média e desvio padrão dos corpos de prova para as determinadas idades de ensaio

Nº do CP	Idade	Média (tf)	Média MPa	Desvio Padrão MPa
LU - 1A	7			
LU - 2A	7	19,04	24,24	1,22
LU - 3A	7			
LU - 4A	14			
LU - 5A	14	26,55	33,81	1,49
LU - 6A	14			
LU - 7A	28			
LU - 8A	28	31,23	39,77	3,47
LU - 9A	28			
LU - 10B	7			
LU - 11B	7	24,77	31,54	5,08
LU - 12B	7			
LU - 13B	14	28,76	36,62	0,95

Nº do CP	Idade	Média (tf)	Média MPa	Desvio Padrão MPa
LU - 14B	14			
LU - 15B	14			
LU - 16B	28			
LU - 17B	28	32,72	41,66	0,91
LU - 18B	28			
LU - 19C	7			
LU - 20C	7	23,55	29,98	3,88
LU - 21C	7			
LU - 22C	14			
LU - 23C	14	30,00	38,20	0,87
LU - 24C	14			
LU - 25C	28			
LU - 26C	28	31,55	40,17	3,91
LU - 27C	28			

Fonte: O autor.

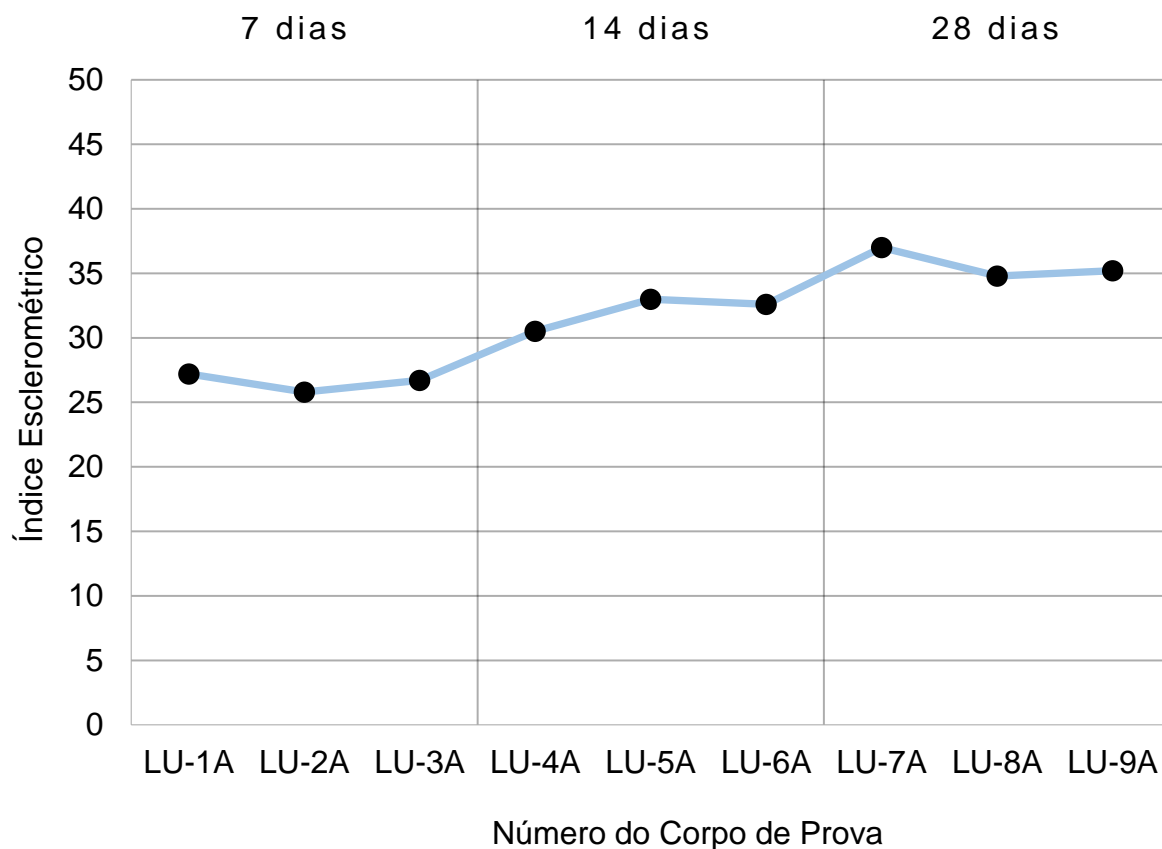
4.2 Resultados dos Ensaios de Esclerometria

O ensaio de esclerometria foi realizado com o intuito de determinar o índice de rebote de cada corpo de prova de concreto, correlacionando os valores obtidos com os resultados de resistência à compressão axial seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 7584 (ABNT, 2012).

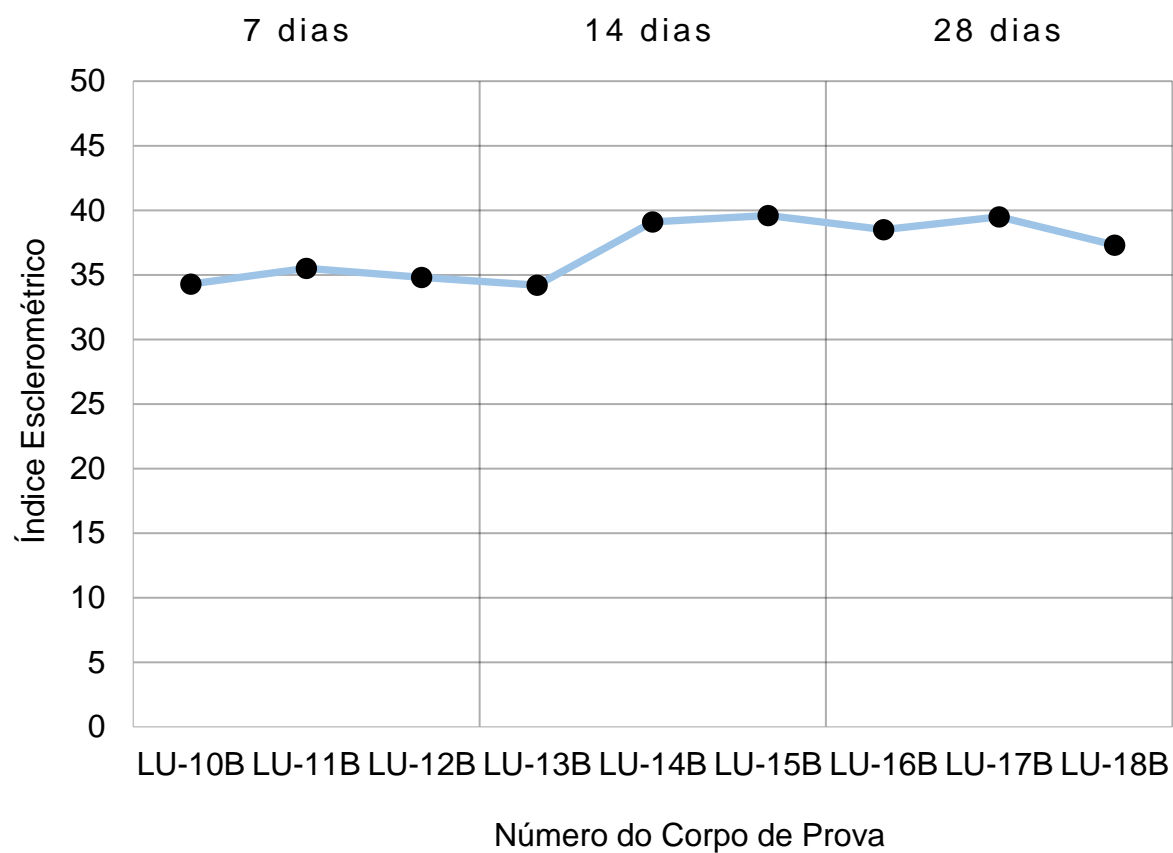
Os resultados demonstraram um comportamento crescente dos índices esclerométricos conforme o aumento da idade do concreto, indicando o endurecimento progressivo da superfície e a continuidade das reações de hidratação. Essa tendência é consistente com o observado por Helene e Pereira (2003) e Oliveira et al. (2018), que relatam aumento significativo do índice de rebote entre 7 e 28 dias para concretos convencionais.

As Figuras 10, 11 e 12 apresentam os valores obtidos para cada classe de resistência e idade de ensaio.

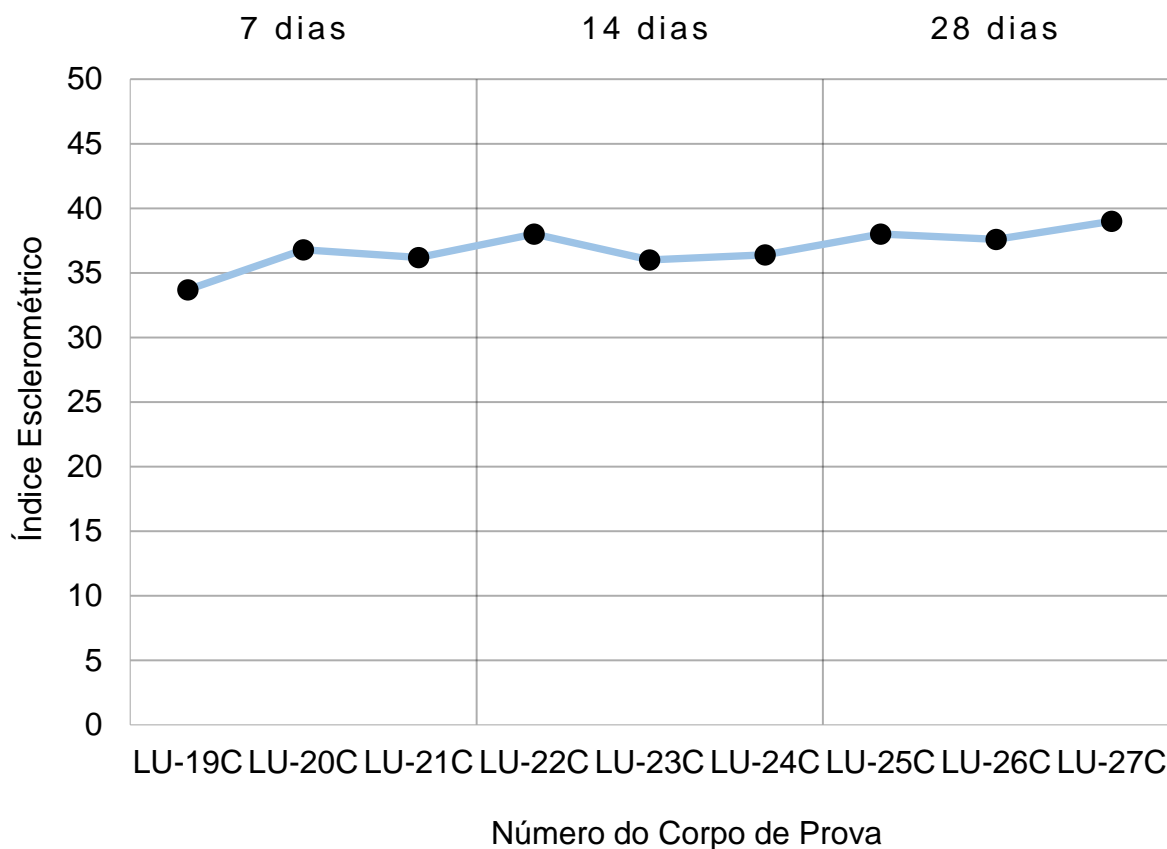
FIGURA 10 - Variação do Índice Esclerométrico do traço A



Fonte: O autor.

FIGURA 11 - Variação do Índice Esclerométrico do traço B

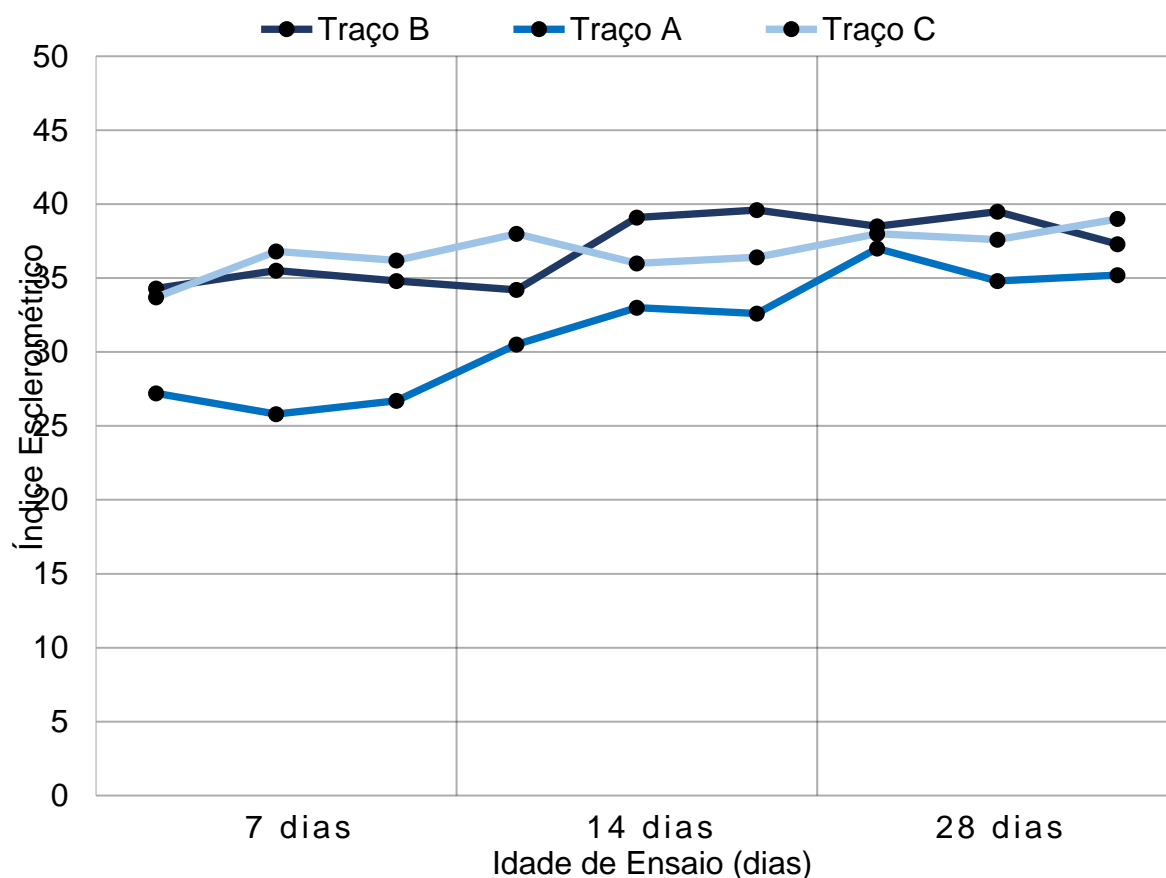
Fonte: O autor.

FIGURA 12 - Variação do Índice Esclerométrico do traço C

Fonte: O autor.

Os valores obtidos evidenciam um aumento contínuo do índice de rebote com a idade e resistência característica, tendo apenas algumas exceções conforme indica Figura 13. Essa diferença é explicada pela maior porosidade inicial e pela maior variação de densificação da matriz nesses concretos, o que resulta em incrementos mais perceptíveis de dureza superficial ao longo do tempo (Mehta; Monteiro, 2014).

Para concretos dos traços B e C, os valores tenderam a se estabilizar após 14 dias, indicando que a fase de hidratação responsável pela formação de compostos cimentícios mais densos já se encontrava avançada. Esse comportamento está em conformidade com o descrito por Neville (2011), que associa a estabilidade dos índices superficiais ao amadurecimento da pasta de cimento e à redução da porosidade.

FIGURA 13 - Variação do Índice Esclerométrico entre os traços

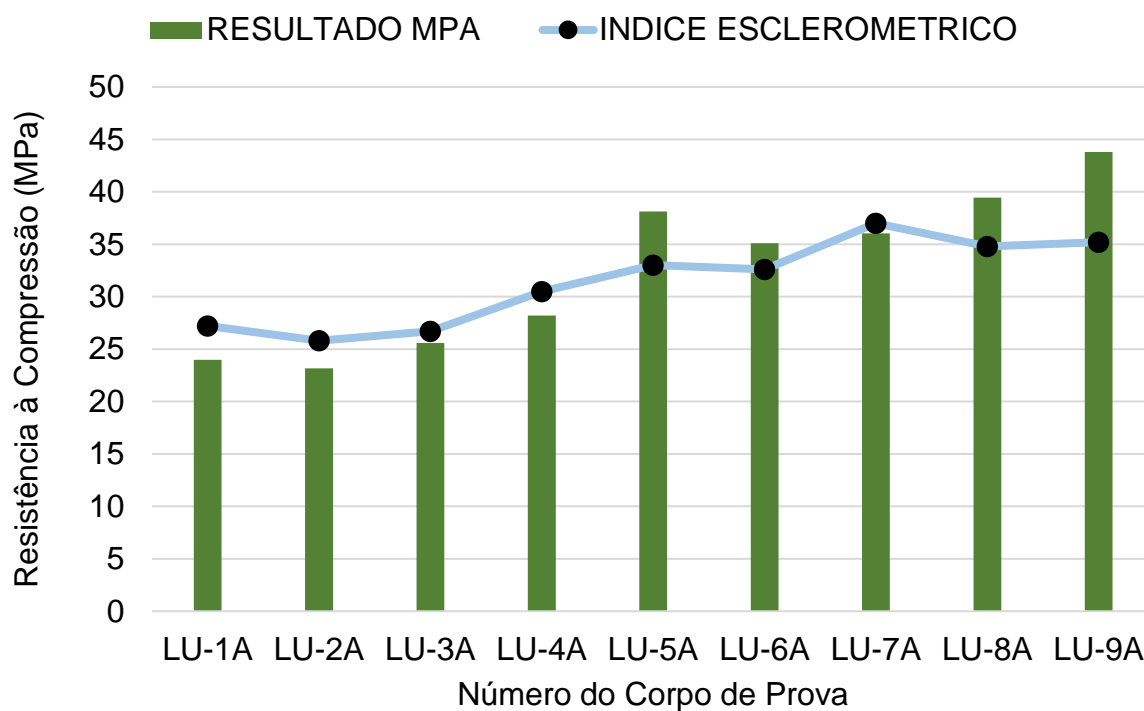
Fonte: O autor.

4.3 Análise Comparativa entre os Ensaios

A comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial e de esclerometria permite avaliar a relação entre a resistência mecânica e o índice de dureza superficial do concreto. Essa análise é fundamental para verificar o potencial da esclerometria como método não destrutivo complementar ao controle tecnológico.

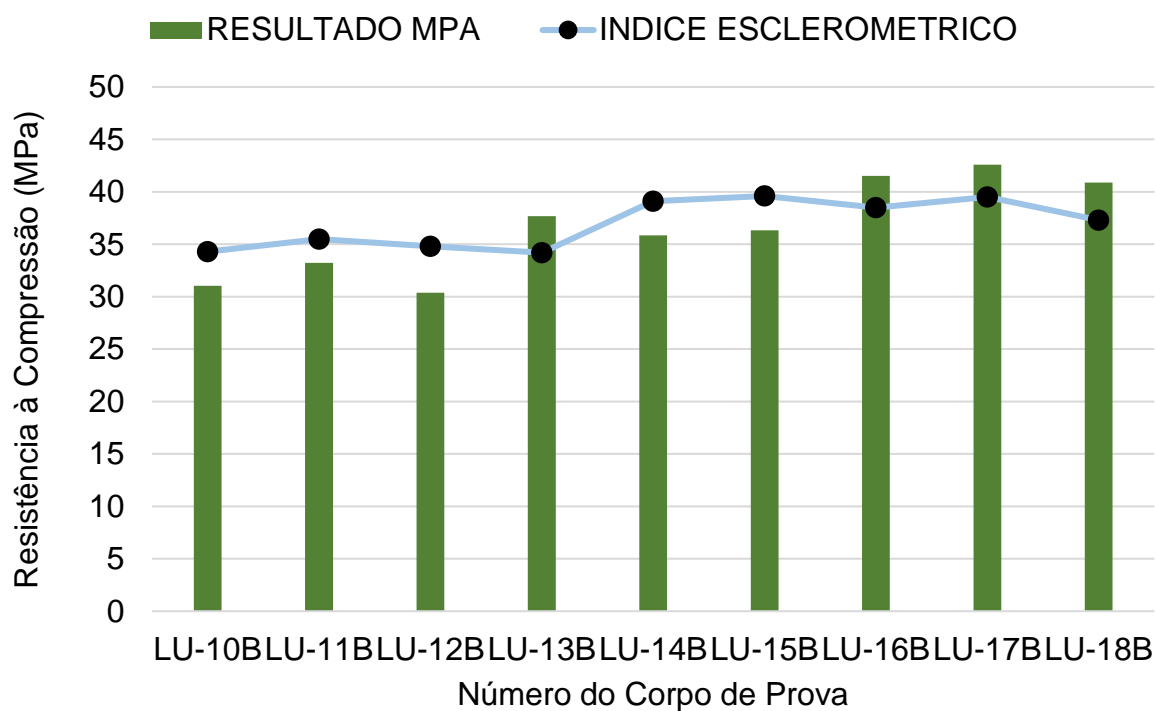
Observa-se, a partir das tabelas e gráficos apresentados, que tanto a resistência à compressão quanto o índice esclerométrico apresentaram crescimento significativo com o aumento da idade, refletindo a evolução natural da hidratação e do ganho de resistência do concreto. A relação entre esses parâmetros é destacada nas Figuras 14 a 16.

FIGURA 14 - Correlação entre a Resistência à Compressão Axial e o Índice Esclerométrico do Traço A



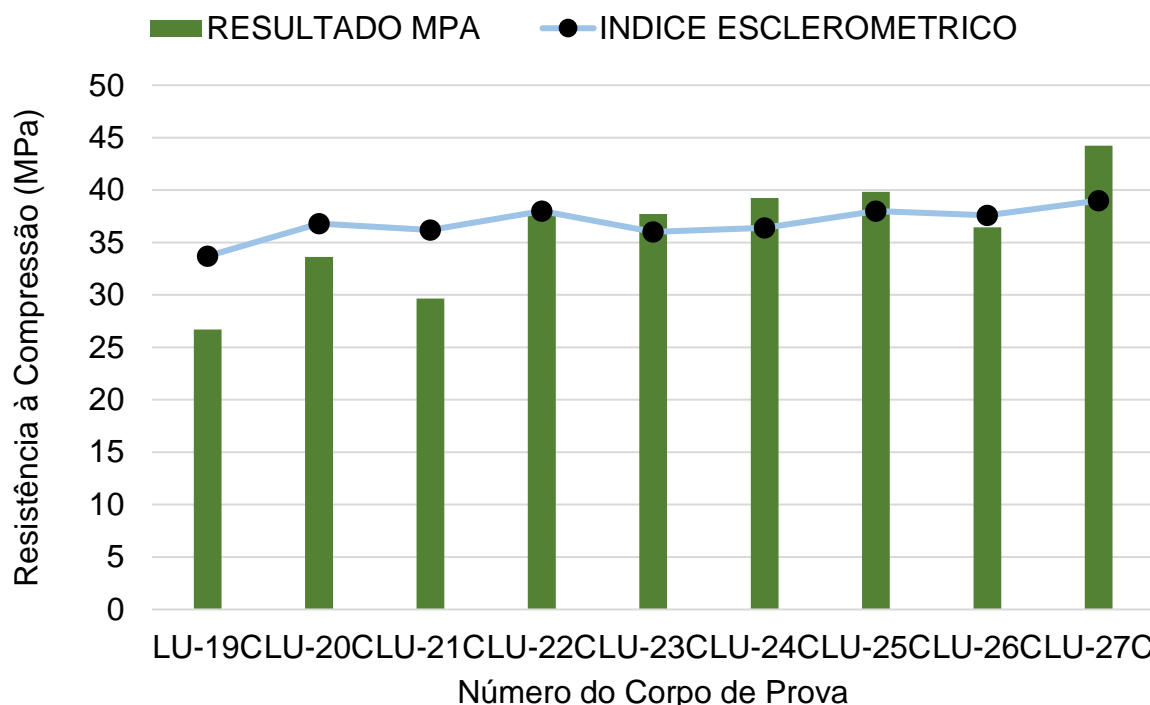
Fonte: O autor.

FIGURA 15 - Correlação entre a Resistência à Compressão Axial e o Índice Esclerométrico do Traço B



Fonte: O autor.

FIGURA 16 - Correlação entre a Resistência à Compressão Axial e o Índice Esclerométrico do Traço C



Fonte: O autor.

Os resultados indicam que os concretos de menor resistência característica apresentaram maior variação relativa nos dois parâmetros, o que está associado à maior sensibilidade da esclerometria em concretos com matriz mais porosa e menos homogênea. Já os concretos do traço A, apresentaram comportamento mais estável, com variações reduzidas entre os corpos de prova, o que evidencia maior uniformidade e menor dispersão dos dados.

De forma geral, verificou-se que os valores médios do índice esclerométrico aumentaram proporcionalmente à resistência à compressão, confirmando a correlação positiva entre os dois métodos de ensaio. Esse comportamento está em conformidade com os estudos de Helene e Pereira (2003) e Oliveira et al. (2018), que destacam que o aumento do índice de rebote acompanha o crescimento da resistência, sendo possível estabelecer relações de correlação específicas para cada tipo de concreto.

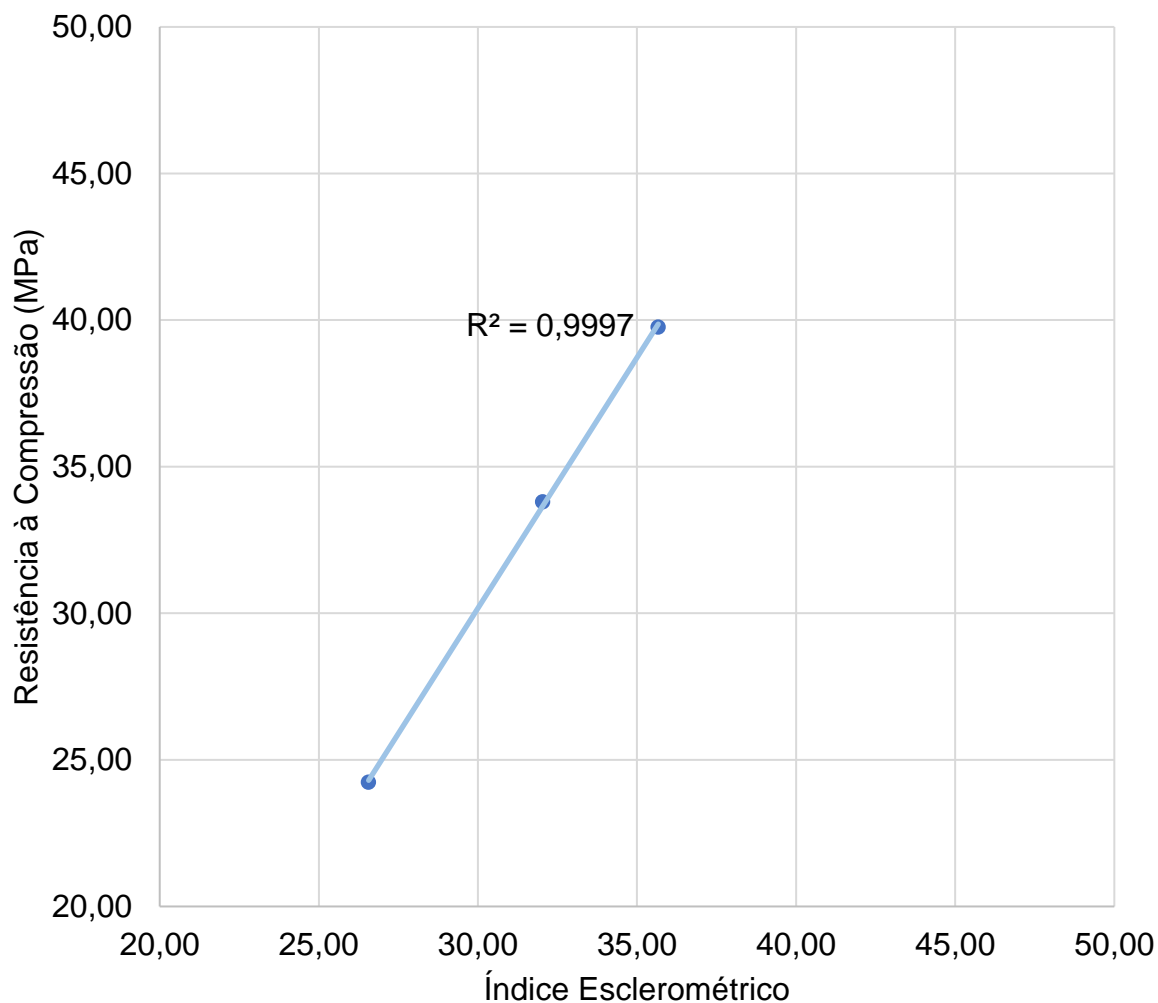
A análise comparativa demonstra, portanto, que os resultados de esclerometria podem ser utilizados como indicativo confiável do comportamento mecânico do

concreto, desde que associados a uma calibração local baseada em ensaios destrutivos complementares. Essa conclusão reforça a viabilidade da aplicação do ensaio de esclerometria no controle tecnológico e diagnóstico de estruturas em concreto armado, conforme também apontado por Carino (2001) e Souza (2020).

4.3.1 Avaliação da Correlação Linear por Meio do Coeficiente de Determinação (R^2)

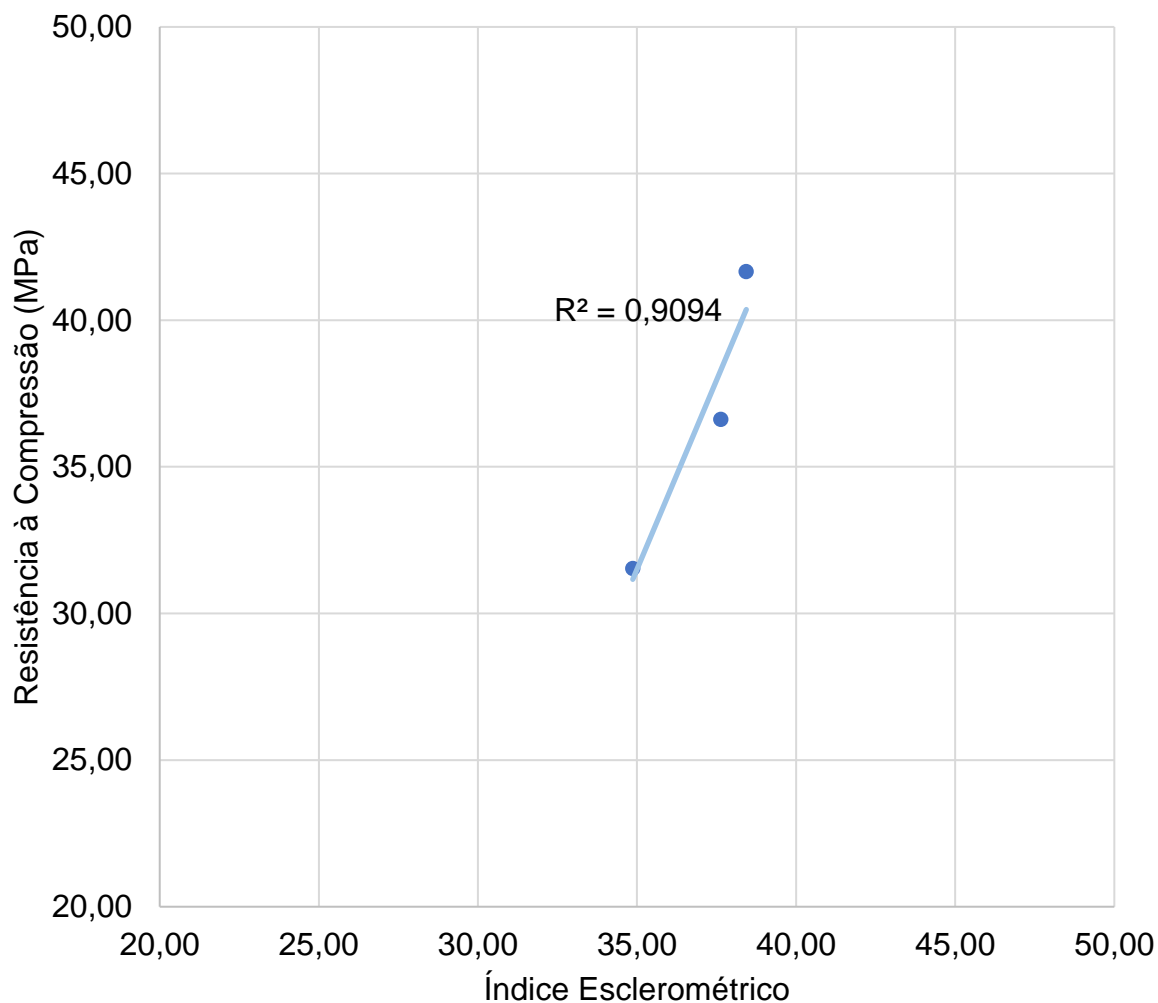
A partir das médias obtidas para cada idade (7, 14 e 28 dias) e para cada traço (A, B e C), foram ajustados modelos lineares de correlação entre os resultados da esclerometria e da resistência à compressão axial conforme aponta as Figuras 17 a 19. Com base nesses ajustes, determinaram-se os valores de SQ_{res} , SQ_{tot} e o coeficiente de determinação (R^2), permitindo avaliar o grau de relação entre os ensaios realizados.

Para o traço A, as médias de resistência foram de 24,24 MPa, 33,81 MPa e 39,77 MPa, associadas aos valores médios esclerométricos de 26,57, 32,03 e 35,67 para 7, 14 e 28 dias, respectivamente. O ajuste linear resultou em $SQ_{res} = 0,0370$, $SQ_{tot} = 122,7545$ e coeficiente $R^2 = 0,9997$, evidenciando elevada correspondência entre os valores médios analisados.

FIGURA 17 - Coeficiente de determinação R^2 do Traço A

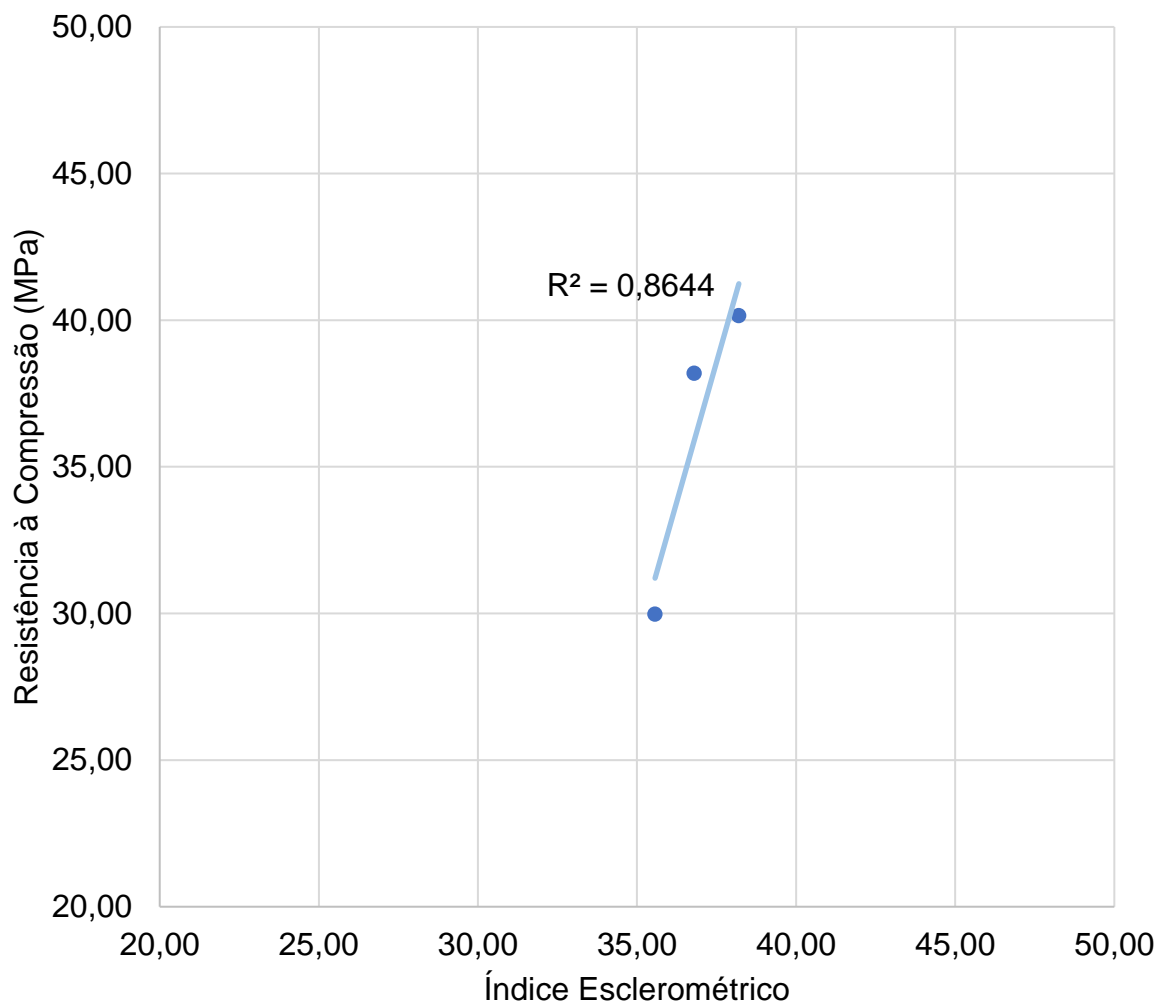
Fonte: O autor.

No traço B, observaram-se médias de 31,54 MPa, 36,62 MPa e 41,66 MPa para resistência à compressão e 34,87, 37,63 e 38,43 para esclerometria. Os valores obtidos foram $SQ_{res} = 4,6424$, $SQ_{tot} = 51,2413$ e $R^2 = 0,9094$, indicando a relação entre os dados médios.

FIGURA 18 - Coeficiente de determinação R^2 do Traço B

Fonte: O autor.

Para o traço C, as médias de resistência foram de 29,98 MPa, 38,20 MPa e 40,17 MPa, enquanto as médias esclerométricas corresponderam a 35,57, 36,80 e 38,20. O modelo ajustado apresentou $SQ_{res} = 7,9118$, $SQ_{tot} = 58,3606$ e coeficiente $R^2 = 0,8644$, demonstrando relação consistente entre os ensaios.

FIGURA 19 - Coeficiente de determinação R^2 do Traço C

Fonte: O autor.

Os valores apresentados demonstram o comportamento estatístico das correlações estabelecidas entre os ensaios não destrutivos e destrutivos para cada traço, servindo como base para a interpretação dos resultados.

5 CONCLUSÃO

Os ensaios realizados permitiram avaliar a correlação entre o método não destrutivo de esclerometria e o ensaio de compressão axial dentre os traços A, B e C. O trabalho experimental contou com moldagem, cura controlada e ensaios em diferentes idades e classes de resistência, permitindo observar o comportamento evolutivo do concreto e a eficiência dos métodos aplicados.

De forma geral, observou-se que os resultados de resistência à compressão superaram os valores de projeto em todas as idades analisadas, indicando adequado controle tecnológico, homogeneidade dos materiais, eficiência de cura e correto processo de moldagem. O desempenho obtido está associado ao tipo de cimento utilizado, à relação água/cimento e às condições favoráveis de cura, fatores que contribuíram diretamente para o desenvolvimento das propriedades mecânicas e para a baixa dispersão dos dados.

O ensaio de esclerometria apresentou comportamento crescente com o avanço da idade do concreto, demonstrando sensibilidade adequada às variações de resistência e confirmando sua aplicabilidade como método de avaliação rápida da dureza superficial. As medições realizadas indicaram que concretos de menor fck apresentaram maiores variações nos índices de rebote, enquanto concretos de maior resistência mostraram comportamento mais estáveis, compatíveis com a redução da porosidade e com a evolução microestrutural proporcionada pela hidratação.

A análise comparativa entre os dois métodos evidenciou uma correlação positiva entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão. Conforme a resistência aumentou, observou-se tendência proporcional de elevação dos valores de esclerometria, indicando que o método não destrutivo acompanha de maneira coerente o ganho mecânico do concreto. A partir dos coeficientes de determinação obtidos, apresentaram valores próximos de 1, indicando que os ajustes lineares se adequaram de forma consistente às médias dos dados experimentais. As relações obtidas apresentaram comportamento predominantemente linear, com pequenas variações esperadas em função da heterogeneidade do material, reforçando o alinhamento entre os dois ensaios e a capacidade do método esclerométrico em refletir alterações reais na resistência.

Com base nos resultados alcançados, conclui-se que a esclerometria se mostra um método complementar viável para complementar o controle tecnológico do

concreto, especialmente em situações onde não se deseja comprometer os elementos estruturais com ensaios destrutivos. A aplicação do ensaio, quando associada a uma calibração local baseada em amostras ensaiadas à compressão, possibilita a obtenção de estimativas mais confiáveis de resistência, contribuindo para o monitoramento da qualidade e segurança das estruturas.

Dessa forma, a pesquisa confirma a indicação de uma relação direta entre os métodos avaliados e reforça a importância da esclerometria como ferramenta de diagnóstico e acompanhamento da resistência do concreto. Recomenda-se, para trabalhos futuros, ampliar a amostragem, incluir diferentes classes de resistência, tipos de cimento e condições de cura, de modo a aprimorar as curvas de correlação e ampliar a aplicabilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS

ADITEC. **E-Last – Orientações de uso**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://aditec.eng.br/e-last-orientacoes.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2025.

ALMEIDA JÚNIOR, E. de O.; COUTO, D. C.; SILVA, D. P. **Determinação da resistência à compressão do concreto por meio de esclerômetro**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC, 61., Fortaleza, 2019. **Anais ...** São Paulo: IBRACON, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Método de dosagem do concreto**. São Paulo: ABCP, 2020. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2020/07/Metodo_Dosagem_Concreto_ABCPonLINE_22.07.2020.pdf. Acesso em: 14 jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:2022 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio 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 7212: Execução de concreto dosado em central**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584: Concreto endurecido – Determinação da resistência à compressão – Ensaio não destrutivo com esclerômetro de reflexão**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto — Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

CARINO, N. J. **The impact-echo method: an overview.** ACI Structural Journal, 2001.

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados.** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HELENE, P.; PEREIRA, F. A. **Controle tecnológico do concreto.** São Paulo: Pini, 2003.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: PINI, 1992.

LEAL JÚNIOR, Gilmar Fonseca; PORTO, Thiago Bomjardim; JORGE, Felipe Sérgio Bastos. *Assessment of resistance to concrete compression using different types of cure.* **International Journal of Geoengineering and Technology (IJGET)**, 2023. Disponível em: <https://revistas.ufvjm.edu.br/ijget/article/view/436>. Acesso em: 9 nov. 2025.

MALHOTRA, V.M. e CARINO, N.J., 2003. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, Second Edition. CRC press.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 4. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION (NRMCA). *Excessive overdesign of concrete mixtures for strength.* **Concrete International**, 2020.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** 5. ed. São Paulo: Bookman, 2011.

OLIVEIRA, A. R. de; LIMA, P. R. L.; MEDEIROS JUNIOR, R. A. **Correlação entre resistência à compressão do concreto e esclerometria por meio de regressões múltiplas.** Revista ALCONPAT, 2018.

RESEARCHGATE. **Experimental testing and numerical simulation of recycled concrete aggregate in a concrete mix.** ResearchGate, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net>. Acesso em: 9 nov. 2025.

SOUZA, J. C. de. **Avaliação da resistência do concreto por meio de esclerometria com diferentes métodos de calibração estatística.** 2020. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.