


Ensaio não destrutivo de ultrassom e esclerometria para estimar a resistência à compressão do concreto

Non-destructive ultrasound and sclerometry tests to estimate the optimization resistance of concrete

Robison Negri¹ , Tatiane Luiza Steil¹, Douglas Negri² 

¹Centro Universitário Católica de Santa Catarina. Jaraguá do Sul, SC, Brasil.

²SENAI Joinville Norte. Joinville, SC, Brasil.

e-mail: robisonnegri@gmail.com, steil_tatiane@hotmail.com, douglas.negri@sc.senai.br

RESUMO

A resistência à compressão do concreto (fck) geralmente é estimulada pelo ensaio de compressão axial, sendo os métodos não destrutivos apontados como segunda opção. O objetivo do estudo é avaliar a qualidade do concreto através de ensaios ultrassônicos e esclerométricos, correlacionando-os ao método de compressão axial. Foram realizados 60 corpos de prova de concreto com idades de 7, 14 e 28 dias. Os resultados dos ensaios de ultrassom apresentaram maior dispersão para 7 dias de idade, possivelmente devido ao seu estágio inicial de cura. Com o avanço da cura, a precisão do ensaio de ultrassom melhorou significativamente, especialmente aos 28 dias. Pode-se afirmar, com 95% de confiança, que resultados de velocidade de propagação de onda acima de 4550 m/s representam resistência à compressão característica superiores a 25 MPa e resistência média superior a 30 MPa. No ensaio de esclerometria, os resultados indicaram resistências superiores às obtidas no ensaio de compressão axial. Para resultados de resistência característica à compressão esclerométrica superior a 38 MPa, os resultados do fck esperados são de 25 MPa, com 95% de confiança. Concluiu-se que os resultados deste estudo apontam para a existência de uma correlação eficaz entre a resistência à compressão obtida nos ensaios distintos.

Palavras-chave: resistência à compressão; ultrassom; esclerometria; ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

Concrete compressive strength (fck) is generally estimated by the axial compression test, with non-destructive methods considered as a second option. The objective of the study is to evaluate the quality of concrete through ultrasonic and sclerometric tests, correlating them with the axial compression method. 60 concrete specimens aged 7, 14 and 28 days were made. The results of the ultrasound tests showed greater dispersion for 7 days of age, possibly due to its initial stage of healing. As healing progressed, the accuracy of the ultrasound assay improved significantly, especially at 28 days. It can be stated, with 95% confidence, that for wave propagation speed results above 4550 m/s, they represent characteristic compressive strength greater than 25 MPa and average resistance greater than 30 MPa. In the sclerometry test, the results indicated higher characteristic resistances than those obtained in the axial compression test. For sclerometric compression strength results greater than 38 MPa, the expected fck results are 25 MPa, with 95% confidence. It was concluded that the results of this study point to the existence of an effective correlation between the compressive strength obtained in the different tests.

Keywords: compressive strength; ultrasound; sclerometry; non-destructive testing.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado no mundo. Na construção civil ele é obtido pela composição de cimento, agregados e água, podendo conter aditivos que também influenciam no seu desempenho, conforme RIBEIRO *et al.* [1].

Um parâmetro importante para avaliação da qualidade do concreto estrutural é a sua resistência à compressão. Segundo HELENE e PACHECO [2], esta propriedade do concreto é adotada por ocasião do

dimensionamento das estruturas, estando diretamente ligada à sua segurança e à estabilidade, sendo o principal parâmetro característico do concreto.

A resistência à compressão representa a capacidade do material em resistir às forças de esmagamento axial. Conforme BASTOS [3], o concreto apresenta alta resistência à compressão, o que faz dele um excelente material para ser empregado em elementos estruturais submetidos a este esforço. Seu emprego também possibilita um ganho considerável de inércia nos elementos submetidos à flexão como vigas e lajes. Dessa forma, a determinação da resistência à compressão do concreto é considerada de extrema relevância para Engenharia Civil.

Existem diversos métodos destrutivos e não destrutivos para a estimação da resistência à compressão do concreto.

Os métodos destrutivos são bastante utilizados no controle tecnológico do concreto e são regidos pela ABNT NBR 5738 [4]. Neste caso, a verificação da resistência à compressão é realizada através da ruptura do material, mediante a aplicação de carga em corpos de prova (CP), moldados ou extraídos diretamente na estrutura.

Apesar de eficientes, os métodos destrutivos apresentam como desvantagem a elevada quantidade de material de descarte após os testes. SANTOS e ISMAIL [5] fizeram um estudo em uma obra que utilizou seis caminhões de concreto por dia, sendo produzidos 72 corpos de prova. Considerando que havia concretagem todos os dias nessa obra, eram descartados, por mês, 1440 corpos de prova. Observa-se que, ao optar pelos ensaios destrutivos, gerou-se uma quantidade significativa de resíduos e desperdício dos insumos. O mesmo princípio pode ser aplicado às fábricas de elementos estruturais pré-moldados. Como exemplo, pode-se mencionar uma fábrica de pré-moldados de Joinville, na qual são produzidos 15,6 m³ de concreto e 8 corpos de prova por dia, que representam em torno de 168 corpos de prova por mês, gerando desperdício de material e mão de obra.

Por outro lado, os métodos não destrutivos são caracterizados por não precisarem danificar o material amostrado, sendo a resistência à compressão estimada de forma indireta a partir de correlação com outras propriedades. De acordo com a ADAMATTI *et al.* [6], o uso de ensaios não destrutivos é uma estratégia interessante para monitorar o estado das estruturas. Também é uma maneira de viabilizar a inspeção e a avaliação do estado de conservação de construções civis, de forma econômica e eficiente CHIES [7].

Como exemplo de aplicação, CARVALHO *et al.* [8] utilizaram o método ultrassônico para verificação da resistência e qualidade do concreto em um edifício em Aracaju – Sergipe. Optaram pelo método no estudo de caso, pela vantagem em se obter análises sem danos às estruturas e pela portabilidade dos equipamentos nas medições em campo, sem a necessidade de recorrer aos laboratórios especializados, facilitando assim o monitoramento contínuo do controle de qualidade. Esses métodos vêm sendo muito utilizados para verificação da conformidade de estruturas existentes, em vários momentos de sua vida útil, oferecendo vantagens significativas no que diz respeito à velocidade de execução, custo e ausência de danos à estrutura, principalmente por não requererem a remoção de amostras para uma posterior análise. SCHIAVON [9].

Portanto, tais métodos podem ser utilizados também como ferramentas para aferição da qualidade das peças estruturais em linhas de produção de estruturas pré-fabricadas, representando um ganho em eficiência e uma redução nos seus impactos ambientais.

Existem vários métodos não destrutivos para avaliar a resistência à compressão dos concretos, no entanto, dois métodos merecem destaque: Método não Destrutivo Ultrassônico (MNDU) e Método não Destrutivo Esclerométrico (MNDE).

O MNDU é baseado na medição da velocidade de propagação de uma onda ultrassônica pela matriz do concreto. Ele tem como principais aplicações: analisar a homogeneidade do concreto; detectar falhas internas de concretagem, bem como profundidade de fissuras e outras anomalias; monitorar as variações das propriedades do concreto, decorrentes do meio de agressividade em que está inserida a estrutura ABNT NBR 8802 [10]. GODINHO *et al.* [11] afirma que também é possível estimar a resistência à compressão do concreto (f_c) mediante sua correlação com a média da velocidade verificada do pulso ultrassônico (VU).

Já o MNDE é um método que permite relacionar a resistência à compressão do concreto com a dureza superficial do concreto, estimada por mecanismo de percussão. A resistência à compressão do concreto (f_c) é correlacionada com índice esclerométrico (IE). ESCOBAR *et al.* [12] explicita que o esclerômetro é versátil por sua leveza, de fácil utilização, baixo valor de aquisição e obtenção rápida de dados, não causando quase nenhum dano à estrutura, principalmente quando comparado a outros métodos destrutivos.

Por tanto, o presente artigo tem por objetivo avaliar a possibilidade de aferir a resistência à compressão do concreto (f_c), por meio dos Método não Destrutivo de Ultrassom e Esclerometria, buscando correlacionar os resultados aos Método Destrutivo Convencional (MDC).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na sequência, será apresentada uma breve revisão bibliográfica acerca do tema, organizado em três sub-capítulos.

2.1. Método destrutivo convencional

O método denominado nesta pesquisa como Método Destrutivo Convencional (MDC), consiste no ensaio de compressão axial de corpo de prova cilíndrico. Normalmente, a resistência à compressão do concreto é avaliada por meio de testemunhos de corpos de provas (CP), moldados de acordo com a ABNT NBR 5738 [4].

No ensaio o CP é submetido a uma força de compressão progressiva aplicada em suas duas faces circulares. De acordo com a ABNT NBR 5739 [13], o carregamento de ensaio é aplicado continuamente e sem choques, com velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, cessando quando ocorre a ruptura do corpo de prova. Deve-se registrar a carga máxima aplicada para a ruptura, possibilitando assim a estimação da resistência à compressão (f_c), expressa, geralmente, em megapascal (MPa).

A resistência característica à compressão (f_{ck}) do concreto pode ser estimada estatisticamente pelos procedimentos propostos pela ABNT NBR 12655 [14], associada às medidas de tendência central e de dispersão dos ensaios de compressão axial (f_c), com amostras de mesmas idade.

2.2. Método não destrutivo ultrassônico

LORENZI *et al.* [15] explicita que o ensaio consiste na medição da velocidade de propagação de um pulso ultrassônico no material (VU). De acordo com a ABNT NBR 8802 [10], a determinação da velocidade é dada pela seguinte equação 1:

$$VU = \frac{l}{t} \quad (1)$$

Sendo: VU - a velocidade de propagação de onda (m/s); l - a distância entre os transdutores de envio e recebimento (m); e, t - o tempo decorrido desde a emissão da onda até sua recepção (s).

O fenômeno tem relação com a natureza do material, sua porosidade e a presença de vazios ou de água no sistema de poros, entre outros fatores. O ensaio em questão pode ser considerado como um dos mais promissores para a avaliação de estruturas de concreto. ANDREUCCI [16].

ADAMATTI [17] menciona que a presença de vazios causa o retardo das ondas, em função da baixa velocidade do som no ar, logo, o tempo de propagação dos pulsos ultrassônicos pode ser correlacionado com a densidade do material.

A seguir, destacam-se os principais fatores intervenientes, segundo a ABNT NBR 8802 [10]:

- As dimensões mínimas das peças - em função da frequência dos transdutores e da velocidade de propagação do pulso ultrassônico. No entanto, ADAMATTI *et al.* [6], explica que o tamanho e a forma do elemento não afetam a velocidade de propagação.
- O comprimento de onda - de acordo com ADAMATTI [17], a velocidade de pulso geralmente não é afetada pelo comprimento do percurso de onda até profundidades de 30 cm. No caso de profundidades maiores podem apresentar distorções na medição. Ainda conclui que a velocidade diminui com o aumento do comprimento do percurso da onda.
- A presença de armadura - segundo a ABNT NBR 8802 [10], isso ocorre devido a velocidade de propagação da onda ultrassônica no aço ser maior que no concreto. Esse fato não impossibilita, porém dificulta o uso da técnica sendo necessária uma complementação com outras técnicas, como, por exemplo, a pacometria, que serve para localizar as armaduras, para o posterior posicionamento dos transdutores de forma a desviá-las durante o ensaio.

De acordo com a ABNT NBR 8802 [10], a aferição da velocidade de propagação da onda ultrassônica pode ser realizada por três métodos, que são: transmissão direta, transmissão indireta e transmissão semidireta.

Neste estudo utilizou-se a transmissão direta, que segundo a ABNT NBR 8802 [10], é o método mais recomendado na determinação da velocidade de propagação de ondas (VU), pois, desta forma, as ondas são recebidas com maior intensidade. Para realizar o ensaio através da transmissão direta, os transdutores devem ser posicionados em faces opostas do elemento de concreto, conforme Figura 1.

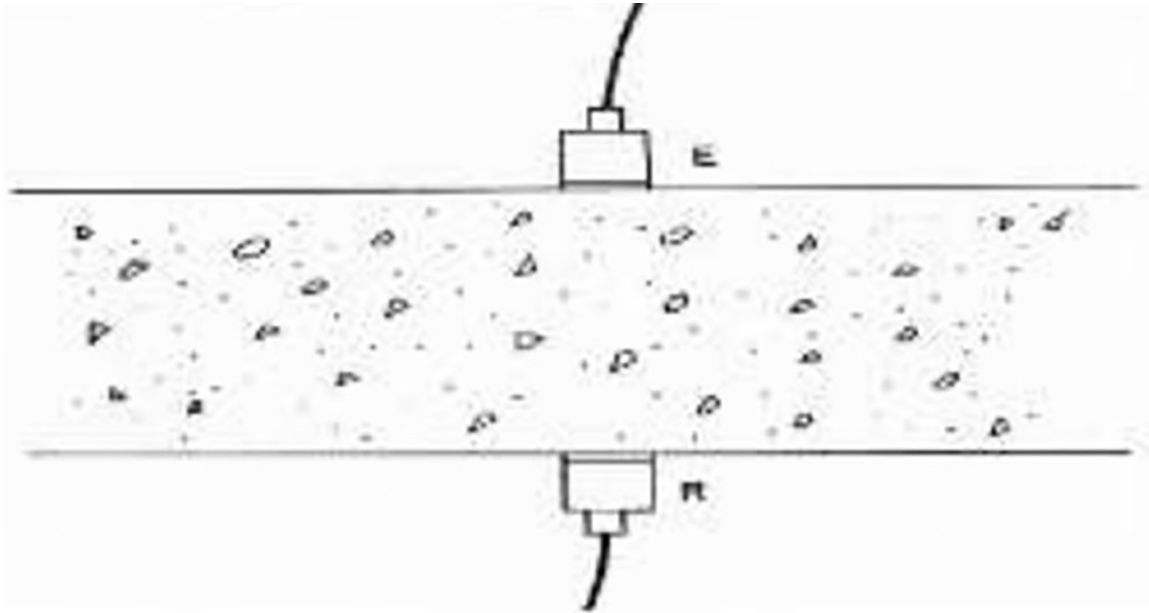


Figura 1: Transmissão direta.

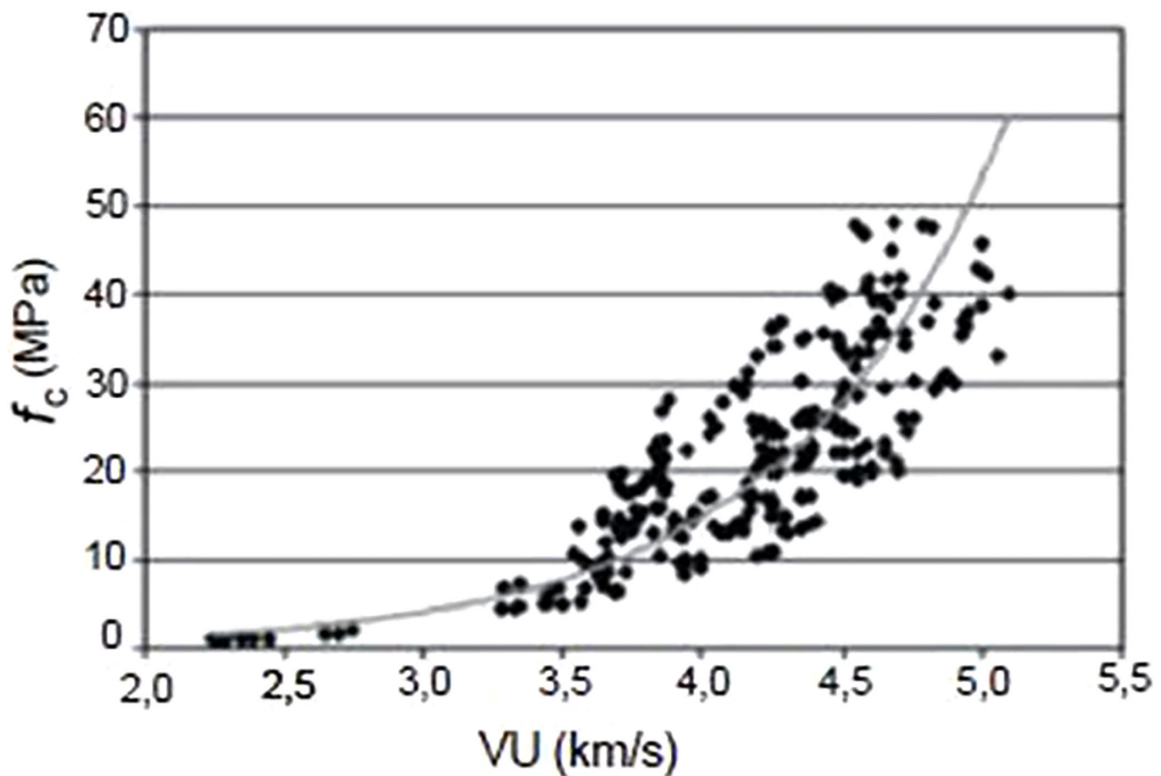


Figura 2: Curva de relação entre a resistência à compressão (f_c) e a velocidade de propagação de onda (VU).

Conforme a Operating Instructions Pundit Lab [18] é fundamental assegurar o acoplamento acústico adequado dos transdutores à superfície do CP. Para isso, deve ser aplicada uma fina camada de pasta de acoplamento entre o transdutor e a superfície do material. Em alguns casos, pode ser necessário preparar a superfície. Os resultados ainda podem ser afetados por diversos fatores relacionados às características do concreto analisado.

Conforme apresentado na Figura 2, obtida por TRTNIK *et al.* [19], a relação entre a resistência à compressão (f_c) e a velocidade de propagação da onda de ultrassom (VU) apresenta comportamento exponencial, com dispersão significativa (coeficiente de correlação é $R^2 = 0,6444$).

LORENZI [20] também desenvolveu estudos de relação entre as velocidades de ultrassom (VU) e as propriedades mecânicas do concreto, sendo que também apresenta uma modelo para a relação entre a velocidade de ultrassom (VU) e a resistência à compressão (f_c), como mostrado na Figura 3, ajustando uma curva logarítmica com coeficiente de determinação $R^2 = 0,532$. Percebe-se a predominância de comportamento experimental (para f_c em função de VU) nos dois estudos. Também predomina o mesmo comportamento de dispersão dos resultados.

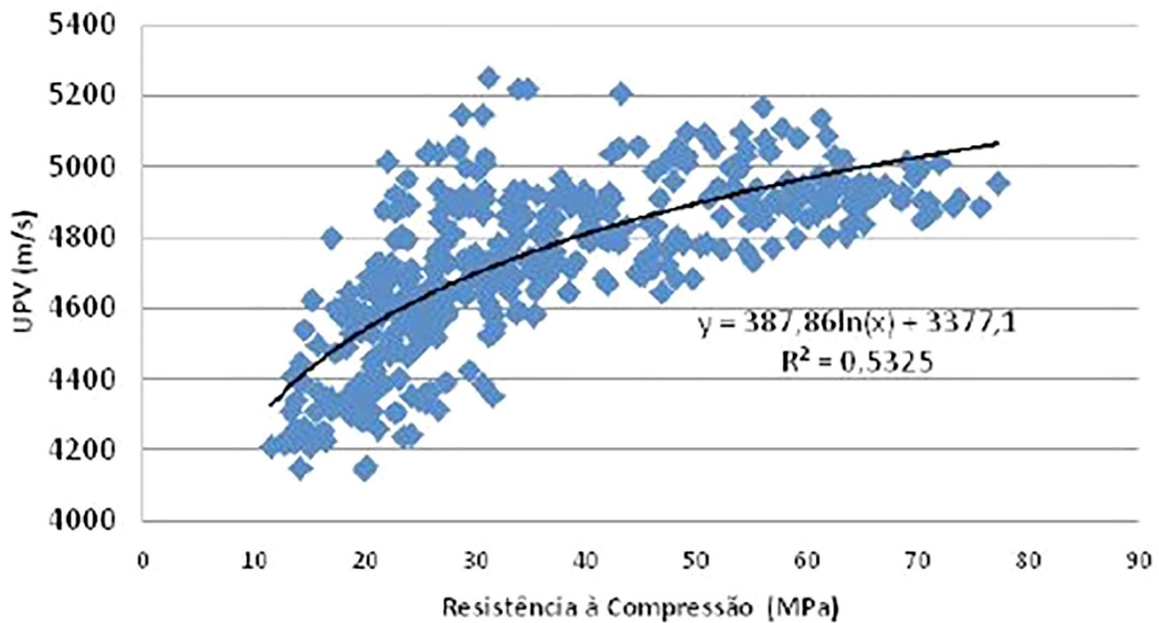


Figura 3: Curva de relação entre a velocidade de propagação de onda (VU) e a resistência à compressão (f_c).

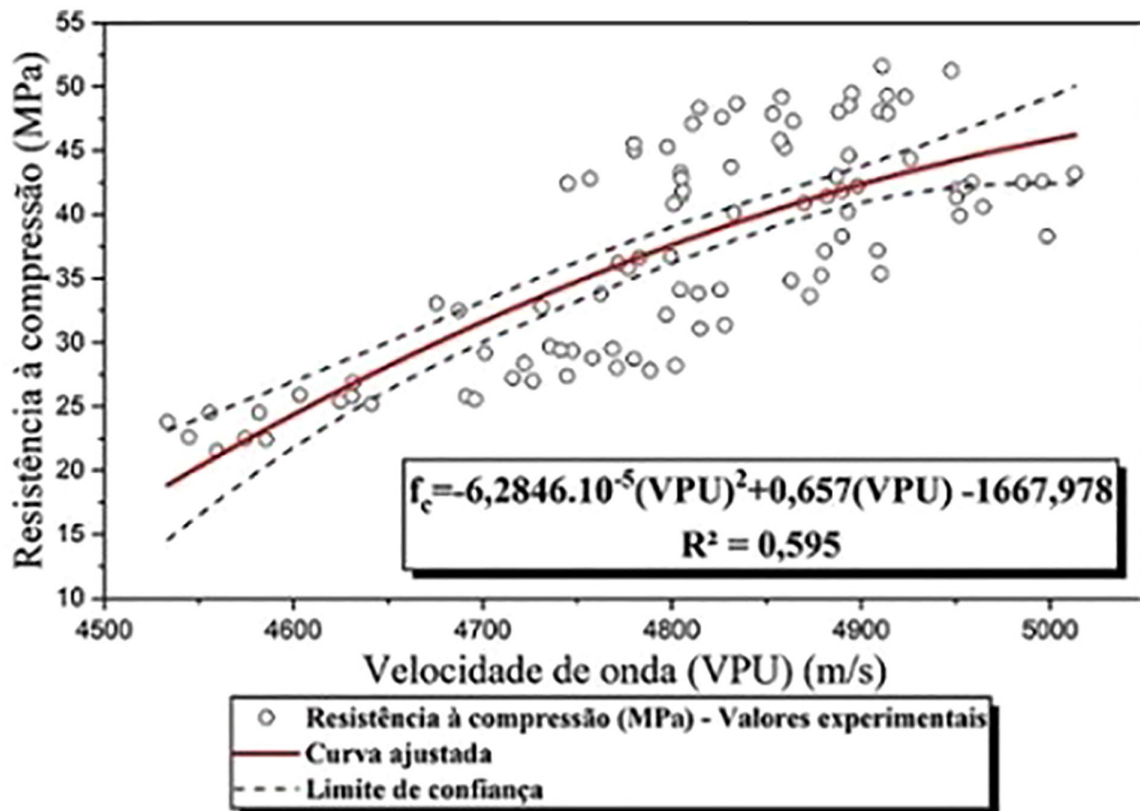


Figura 4: Melhor curva proposta para a relação entre a resistência à compressão (f_c) e a velocidade de propagação de onda (VU).

CAMARGO e FERRARI [21], por sua vez, analisaram a relação entre a resistência à compressão (f_c) e velocidade do pulso ultrassônico (VU representado por VPU) em 05 corpos de prova para as idades de 14, 28 e 56 dias. Os autores desenvolveram uma análise de regressão não linear simples, comparando equações do tipo linear, potência, exponencial e polinomial do 2º grau. A escolha da equação que apresentou melhor representatividade está apresentada na Figura 4.

Os autores também analisaram a evolução da velocidade de onda ultrassônica (VPU) ao longo de sua idade e relação água/cimento. Pode-se observar que com a diminuição da relação água/cimento, os concretos apresentaram menor variação na velocidade de propagação entre as idades, o que, de acordo com os autores, pode estar relacionado à maior rigidez da matriz de cimento.

A Figura 5, também apresenta os resultados das resistências à compressão (f_c) em relação à velocidade de ultrassom (VU), elaborada por MOHAMAD *et al.* [22]. Verificaram uma diminuição da confiança do modelo com o aumento da resistência do concreto. A função potencial foi a que melhor representou o fenômeno.

MOHAMAD *et al.* [22] também avaliaram a influência do tipo de cimento portland (CP IV -32 e CP V -ARI), das dimensões dos agregados graúdos de origem basáltica (brita 0, 1 e 2) e da relação água/cimento. Os resultados indicaram que há pouca diferença da VU com o diâmetro do agregado graúdo e o tipo de cimento, para as mesmas idades (7, 14 e 28 dias). Já a relação água/cimento influenciou mais significativamente nos resultados de velocidade de ultrassom.

EVANGELISTA [23] também realizou estudos sobre o comportamento da velocidade de ultrassom (VU) e da resistência à compressão (f_c), para diferentes tipos de agregados graúdo (gnaisse, traquito e argila expandida), com dois diâmetros máximos (9,5 e 19 mm) e dois tipos de cimento (CP II-32 e CP V-ARI). Alguns resultados são apresentados na Figura 6, apontando para uma diminuição da VU nos concretos com argila expandida e nos concretos confeccionados com agregado de menor dimensão. O tipo de cimento representou uma mudança significativa na VU.

GODINHO *et al.* [24] analisou a velocidade de propagação considerando 3 tipos de cimento (CP II e CP IV e CP V) em idades de cura e condições de saturação diferentes. conforme apresentado na Figura 7, o tipo de cimento e a saturação dos corpos de prova apresenta influenciam nos resultados, sendo que a condição saturada aumenta a velocidade de propagação (VU).

GODINHO *et al.* [11] constataram também que a velocidade de ultrassom aumenta dos 7 aos 91 dias apenas 6% para o CP V e aproximadamente 23% para os cimentos CP II Z e CP IV, sendo que afirmam que o tipo de cimento influenciou nos resultados de velocidade ultrassônica (VU).

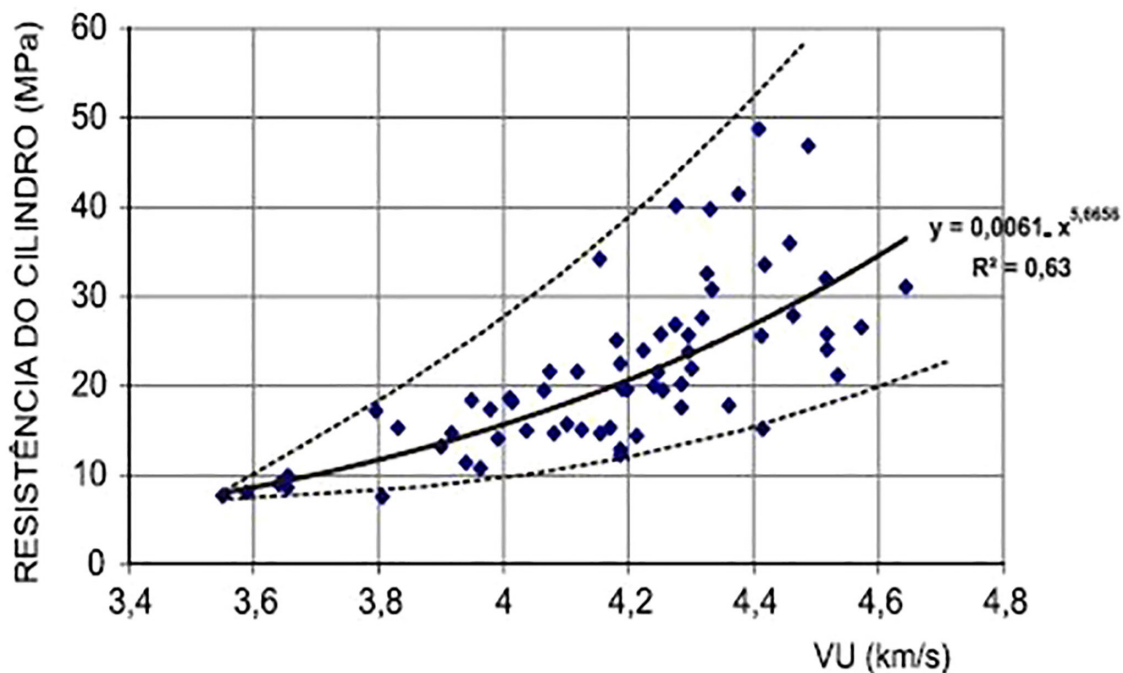


Figura 5: Nível de confiança da relação entre a resistência à compressão experimental (f_c) e a velocidade de propagação de onda (VU).

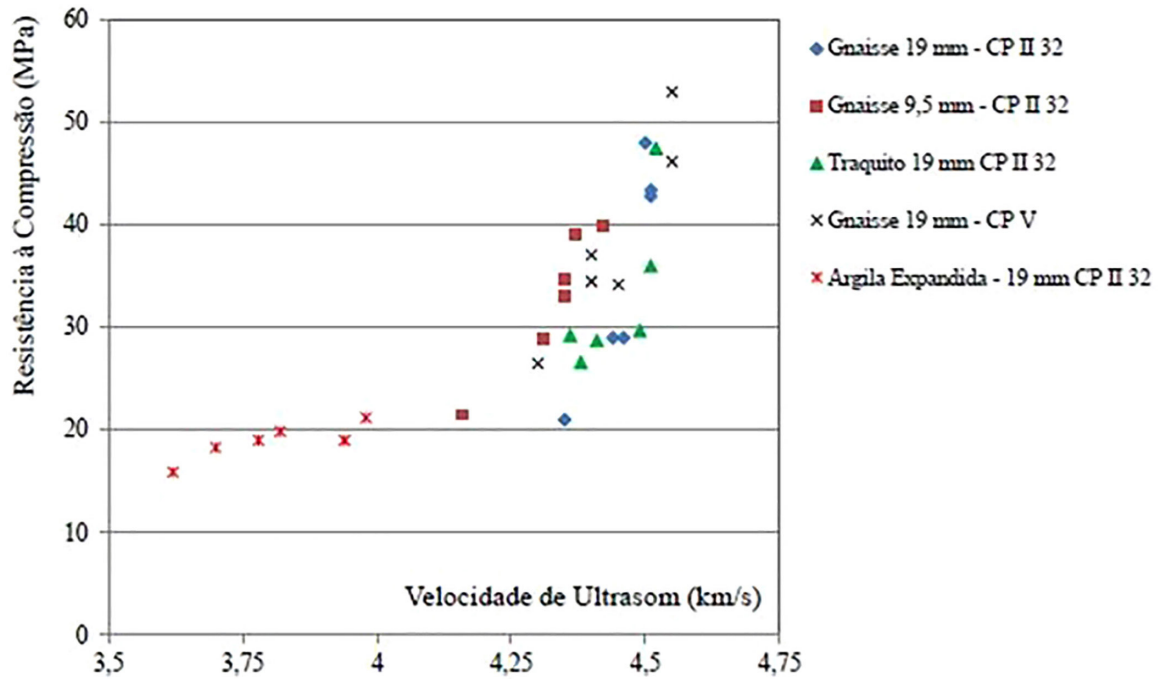


Figura 6: Influência das características do agregado e tipo do cimento na resistência à compressão (f_c) e na velocidade de propagação da onda (VU).

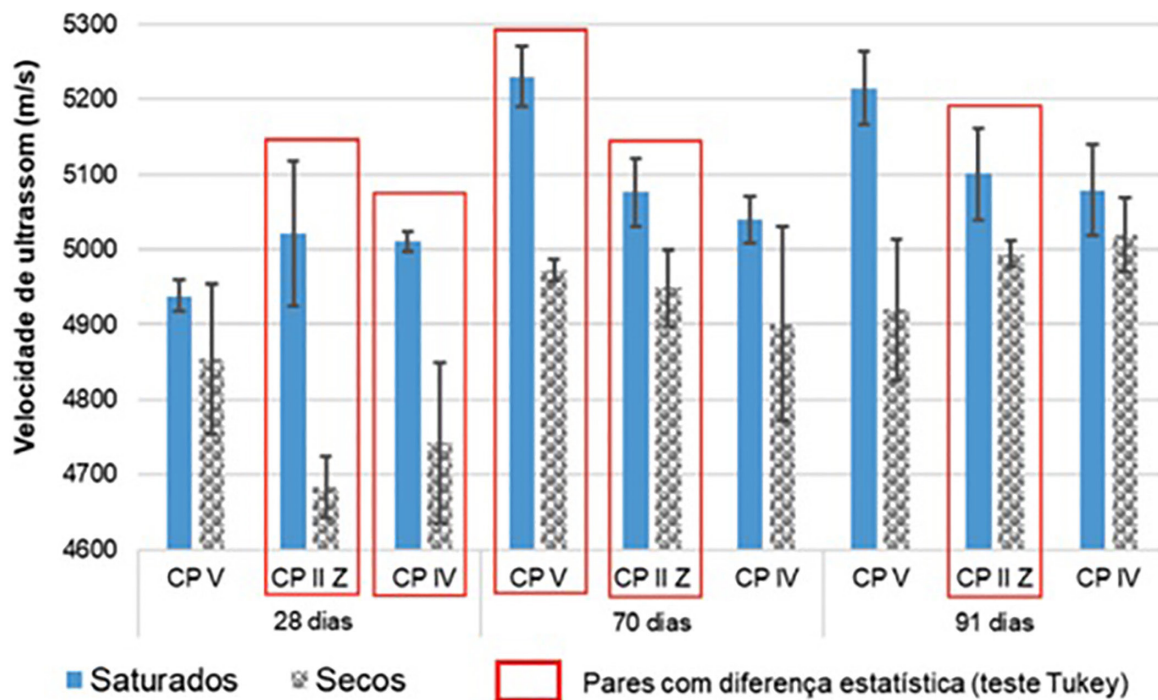


Figura 7: Velocidade de propagação da onda (VU) para os três tipos de cimentos, em três idades, comparando corpos de prova saturados com secos.

FORIGO *et al.* [25] fizeram uma análise da influência da temperatura na propagação da onda e na resistência à compressão do concreto. Eles identificaram que o concreto aquecido na faixa de temperatura de 300°C a 600°C apresenta uma gradual perda de resistência e, conseqüentemente, redução da velocidade de propagação, explicada pelo aumento na degradação do concreto (o calor altera a microestrutura do material).

Com isso, conclui-se que os resultados são promissores, no entanto, ainda existem desafios no que tange à redução das incertezas dos modelos que relacionam a velocidade de propagação de ondas (VU) e resistência à compressão (f_c) nos concretos.

2.3. Método não destrutivo esclerométrico

O ensaio de esclerometria é um método também considerado não destrutivo, que mede a dureza superficial do concreto e a relaciona com a sua resistência à compressão (f_c). No ensaio um martelo padrão choca-se com a superfície do concreto e retorna uma leitura denominada índice esclerométrico (IE). ABNT NBR 7584 [26]. O resultado do ensaio, aplicado o método de qualificação da amostragem proposto pela norma, e considerando os coeficientes de correlação do equipamento utilizado, permite estimar diretamente a resistência à compressão do concreto ($f_{c_{ESC}}$).

Para realização do ensaio, a ABNT NBR 7584 [26] recomenda que a superfície da amostra esteja seca ao ar, limpa e preferencialmente plana e uniforme. Além disso, é preciso evitar impactos sobre a armadura. No procedimento recomendado são realizadas dezesseis leituras em cada teste, espaçadas com 3cm entre elas, sem repetir a área de aplicação, conforme ilustra a Figura 8. Considerando as dimensões dos corpos de prova cilíndrico (10 cm de diâmetro), na presente pesquisa, adaptações, que serão descritas no capítulo 3, se fizeram necessárias.

Também é recomendado que seja realizada a inspeção visual da superfície do concreto a ser ensaiado, a fim de garantir sua conformidade e integridade. SPÍNDOLA e CASCUDO [27].

MOHAMAD *et al.* [22] mostra na Figura 9 os resultados obtidos para relação entre a resistência à compressão concreto (f_c) e o índice esclerométrico (IE). Pode-se verificar que a variabilidade dos resultados encontrados aumenta com o aumento do IE e a função potencial também se mostrou adequada para representação dos resultados.

EVANGELISTA [23] também estudou a relação entre o EI e a resistência à compressão (f_c) para diferentes diâmetros máximos de agregados e tipos de cimento (Figura 10). Não se verificou diferenças significativas, no entanto, os concretos confeccionados com agregados do tipo gnaisse de 19 mm e cimento CP V ARI, apresentaram resultados ligeiramente maiores de IE que os de argila expandida.

No estudo de SOUZA *et al.* [28] foi avaliado o concreto de um viaduto em Curitiba/PR, por meio dos dois métodos não destrutivos abordados no presente trabalho. Os resultados obtidos pelo MNDE foram ligeiramente maiores que os obtidos pelos MNDU e MDC, conforme se pode observar na Figura 11. O MNDE também apresentou maior dispersão nos resultados quando comparado com os demais, que pode ser explicado por

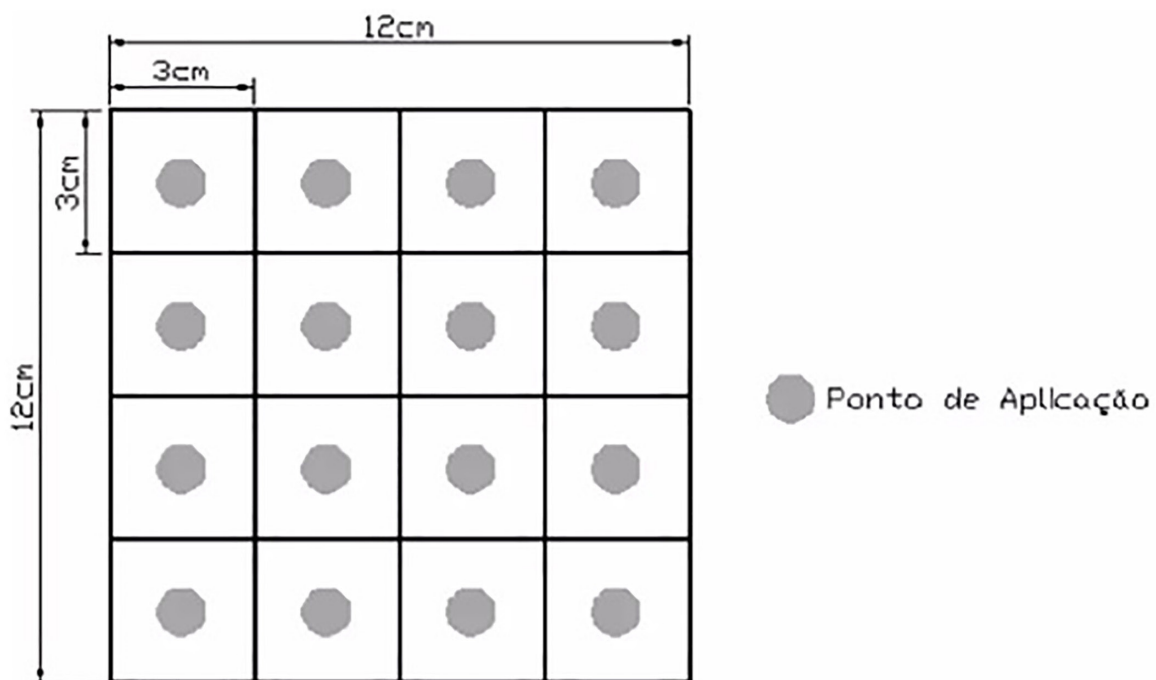


Figura 8: Área de ensaio e pontos de impacto do esclerômetro.

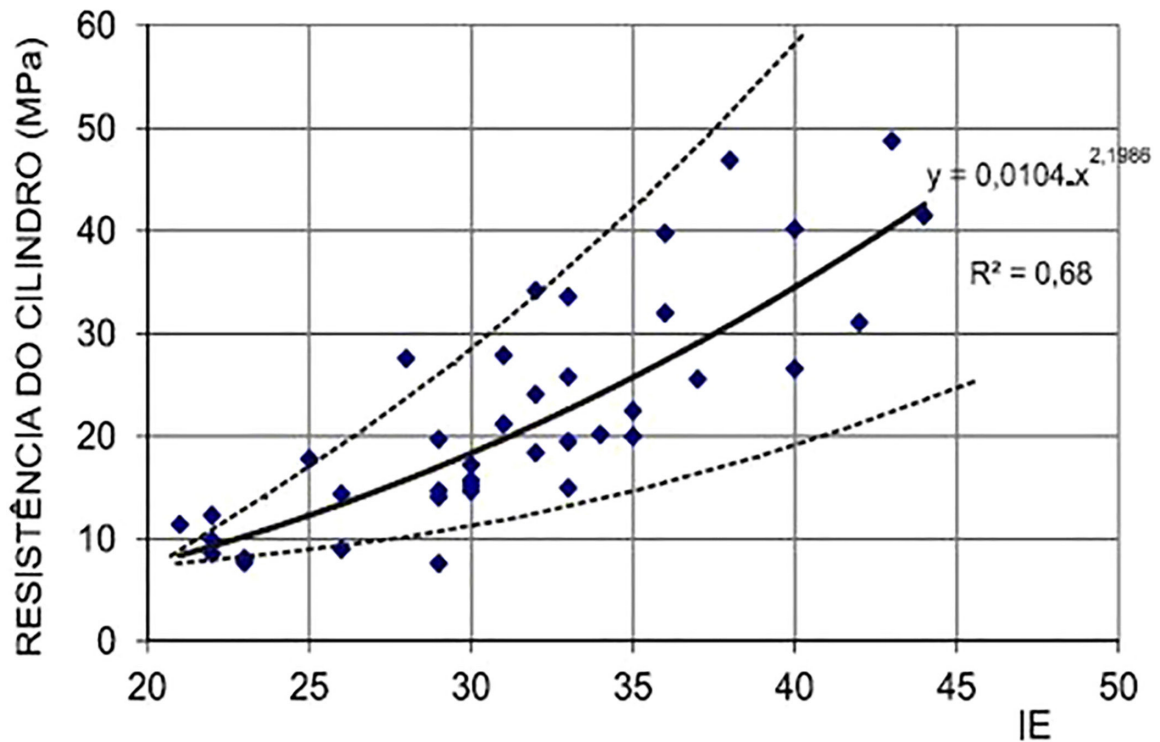


Figura 9: Análise de confiança entre a resistência à compressão (fc) e o índice esclerométrico (IE).

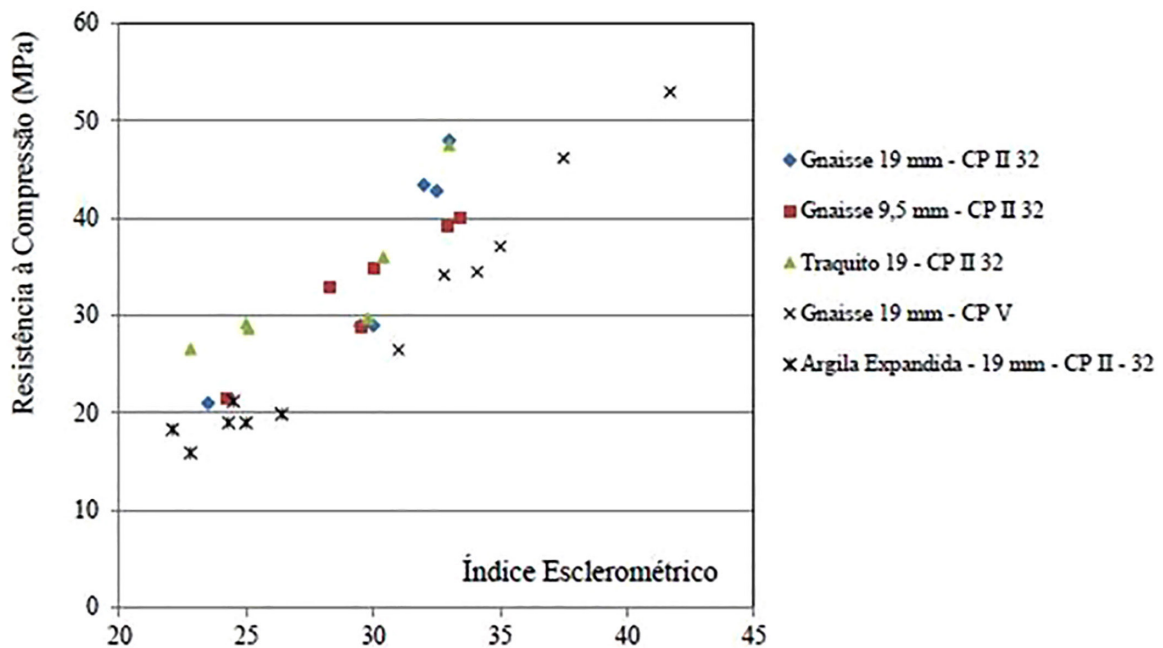


Figura 10: Influência das características do agregado e tipo do cimento na resistência à compressão (fc) e no índice esclerométrico (IE).

variáveis intrínsecas à superfície do concreto e também pelo modelo de cálculo da resistência, onde pequenas variações na média esclerométrica representam grandes variações na resistência, devido ao seu comportamento exponencial.

O MNDE é mais fácil e mais barato para estimar a resistência característica à compressão do concreto. No entanto, os resultados dos ensaios podem ser mais facilmente afetados por fatores, tais como: mão de obra

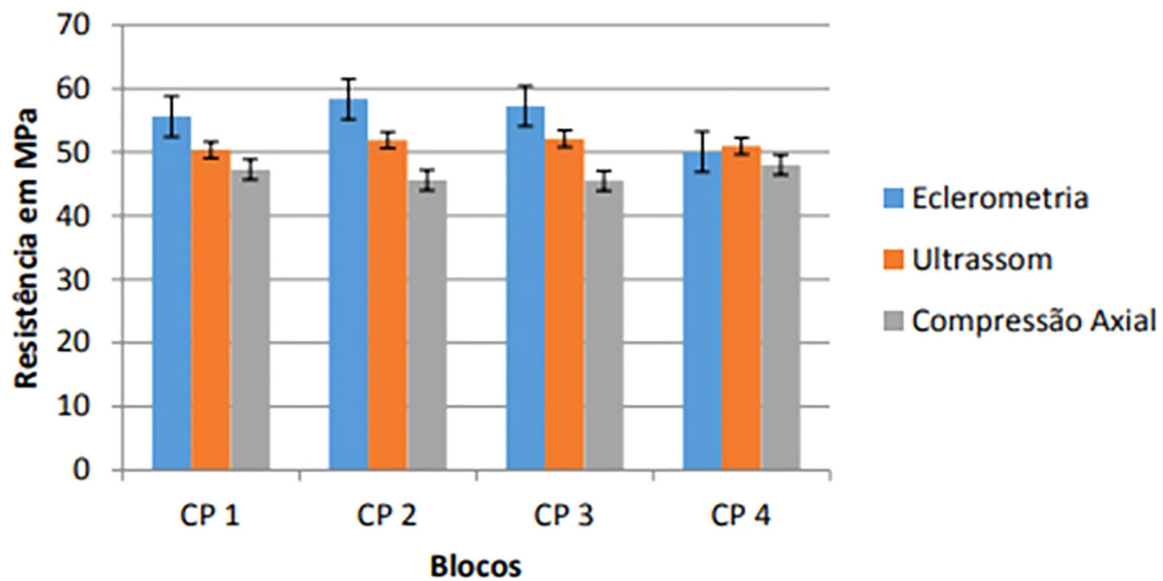


Figura 11: Gráfico de comparação entre os resultados do MNDE, MNDU e MDC.

qualificada, pois durante a operação é preciso imprimir pressões uniformes sobre a superfície de ensaio; tipo e quantidade de cimento, que podem influenciar na rigidez do concreto e no valor do índice esclerométrico; a carbonatação do concreto, fenômeno relacionado ao aumento da concentração de gás carbônico (CO_2) na atmosfera que afeta diretamente as estruturas de concreto.

PAIVA *et al.* [29]. A ABNT NBR 7584 [26] recomenda que o ensaio de esclerometria seja usado como um método adicional ou um ensaio complementar e não como um substituto para o ensaio de resistência à compressão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a resistência à compressão do concreto (f_c) dos corpos de prova de uma fábrica de lajes pré-moldadas, localizada em Joinville/SC, por meio de ensaio destrutivo convencional (MDC) e dos ensaios não destrutivos ultrassônico (MNDU) e esclerométrico (MNDE).

A fábrica atualmente funciona em um único turno e tem por meta a produção 15,6 m³ de lajes por dia, que representam em torno de 20 a 25 lajes, sendo a produção diária considerada um lote de controle de qualidade.

Neste contexto, insere-se o referido estudo, com o intuito de avaliar alternativas técnicas para aferir a qualidade do processo fabril. Dessa forma foi proposto o planejamento experimental apresentado na Figura 12.

O concreto utilizado foi produzido na própria fábrica, sendo adotado o mesmo traço pré-estabelecido. A resistência característica esperada aos 28 dias de idade para traço estudado é de 30 MPa. As características dos materiais constituintes do concreto são apresentados na Tabela 1.

O tempo de mistura foi de cerca de 6 minutos em misturador planetário de 1000 litros. Para produção dos corpos de prova (CP) realizou-se a preparação dos moldes, com a aplicação de desmoldante à base de óleo mineral, de modo a garantir uma melhor uniformidade à amostra. Para a amostragem foram moldados 60 CP's cilíndricos com 10 cm de diâmetro, de acordo com o método descrito na ABNT NBR 5738 [4] e considerando uma defasagem igual a 7, 14 e 28 dias de idade.

O processo de adensamento seguiu os procedimentos recomendados pela ABNT NBR 5738 [4]. A desforma ocorreu 24 horas após a moldagem, tomando os cuidados necessários para não danificar o CP. Após a desforma, o CP foi mantido submerso em água saturada de cal, tendo sido retirado 24h antes da realização da bateria de ensaios.

Os corpos de prova foram previamente preparados, conforme especificações da norma ABNT NBR 8802 [10], de modo que as superfícies a serem ensaiadas estivessem planas, lisas e isentas de sujeira.

Para a realização do ensaio de ultrassom foi utilizado equipamento de emissão e recepção de ondas ultrassônicas da marca PROCEQ, modelo Pundit PL 200. Este equipamento é formado por dois transdutores,

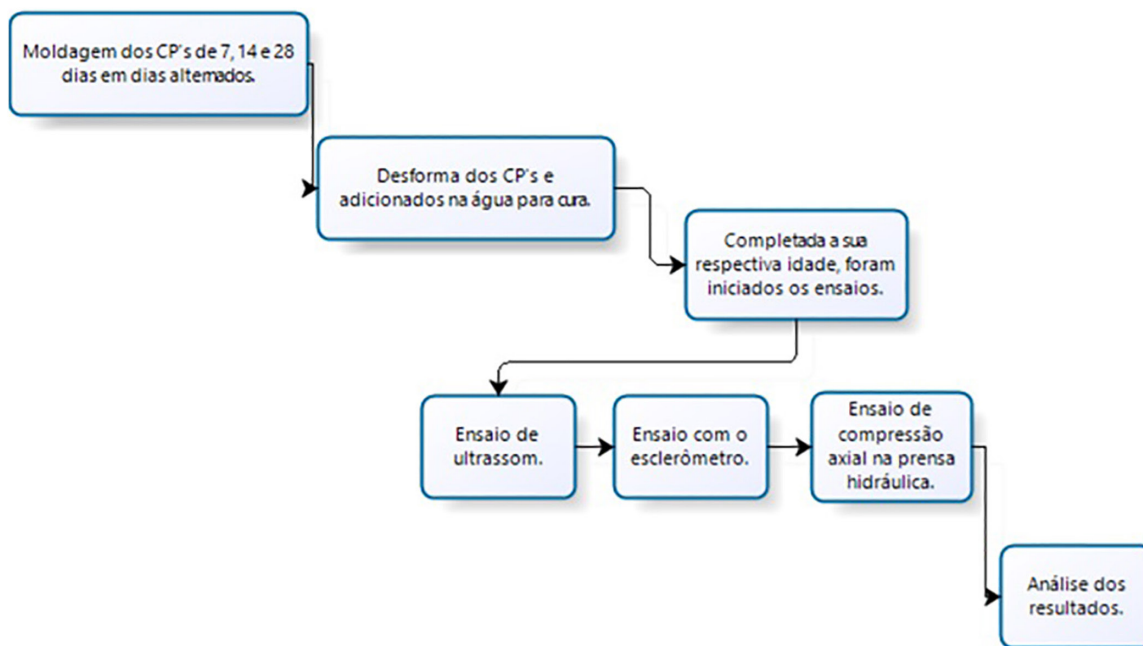


Figura 12: Planejamento experimental.

Tabela 1: Materiais constituintes do concreto estudado.

MATERIAL	CARACTERÍSTICA	QUANTIDADE
Agregado miúdo	Areia natural	345 kg
Agregado miúdo	Areia industrial	517 kg
Agregado graúdo	Brita 0	312 kg
Agregado graúdo	Brita 1	719 kg
Cimento	CP V-ARI	340 kg
Água/Cimento	0,50	Correção de Umidade
Aditivo	CQ Flow Accelera 9060	2000 ml

sendo um para emitir o pulso de onda no concreto, e o outro para detecção da chegada e medição do tempo de trânsito do pulso no concreto. A frequência utilizada foi de 54 Hz. Para garantir um bom acoplamento entre o concreto e os transdutores foi utilizado gel indutor apropriado. As medições foram realizadas conforme demonstrado na Figura 13. O tempo médio para cada medição foi de aproximadamente 18 segundos.

Para realização do ensaio com o esclerômetro, foi utilizado o equipamento chamado de esclerômetro de reflexão, da marca suíça PROCEQ, modelo Silver Schmitd. O equipamento foi aferido com a realização de 10 impactos em bigorna de aço com dureza de 5.000 MPa. Após a aferição foi determinado o fator de correção (k) que consistiu na divisão da média dos impactos por 75 (índice esclerométrico nominal).

Vale ressaltar que a esclerometria foi realizada após o ensaio de ultrassom, a fim de evitar que os impactos pontuais do esclerômetro provocassem algum tipo de dano na amostra. Durante o ensaio o CP foi apoiado ao solo, aplicando-se o teste na fase oposta (Figura 14). Foram aplicados 16 repiques na face superior do CP, conforme prevê a ABNT NBR 7584 [26], distribuídos aproximadamente a cada 2,5 cm de distância.

Logo após a finalização dos ensaios não destrutivos realizou-se o ensaio de compressão axial em prensa hidráulica (Figura 15). A prensa hidráulica utilizada foi a da marca Solotest com frequência de 50/60 Hz. O ensaio seguiu os procedimentos da ABNT NBR 5739 [13].



Figura 13: Ensaio de velocidade de onda ultrassônica.

4. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os valores da média e desvio padrão das propriedades pedidas pelos três métodos de ensaio e para as idades de cura estudadas.

Analisando inicialmente os resultados da resistência à compressão (f_c), obtidos pelo MDC aos 7, 14 e 28 dias, apresentados na Figura 16, pode se verificar que a resistência à compressão obtida pelo MDC (f_c) apresentou uma evolução significativa nas primeiras idades, atingindo uma média aos 28 dias superior à 30 MPa, com um desvio padrão de 3,4 MPa, sendo a dispersão dos resultados congruente sem presença de outliers.

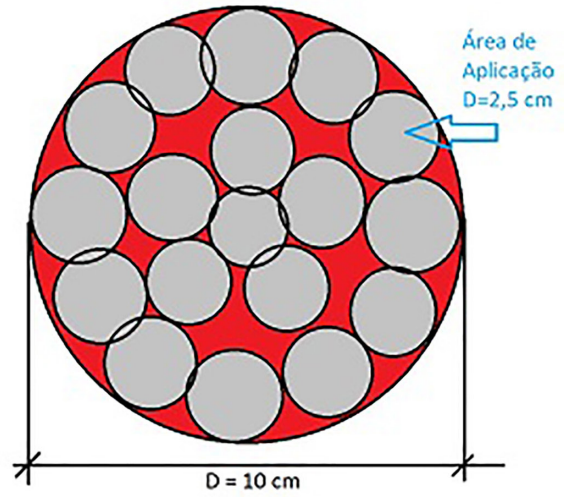


Figura 14: Ensaio de esclerometria.



Figura 15: Ensaio à compressão axial na prensa hidráulica.

Tabela 2: Resultados médios e desvio padrão para 7, 14 e 28 dias de idade.

ENSAIO	7 DIAS			14 DIAS			28 DIAS		
	MNDU VU (m/s)	MNDE IE _{ESC} (MPa)	MDC f _c (MPa)	MNDU m/s	MNDE MPa	MDC MPa	MNDU m/s	MNDE MPa	MDC MPa
MÉDIA	4157,4	30,9	22,3	4161,4	33,7	29,7	4442,2	38,8	30,4
DESVIO PADRÃO	547,3	3,5	3,9	392,4	3,9	1,7	92,2	4,2	3,4

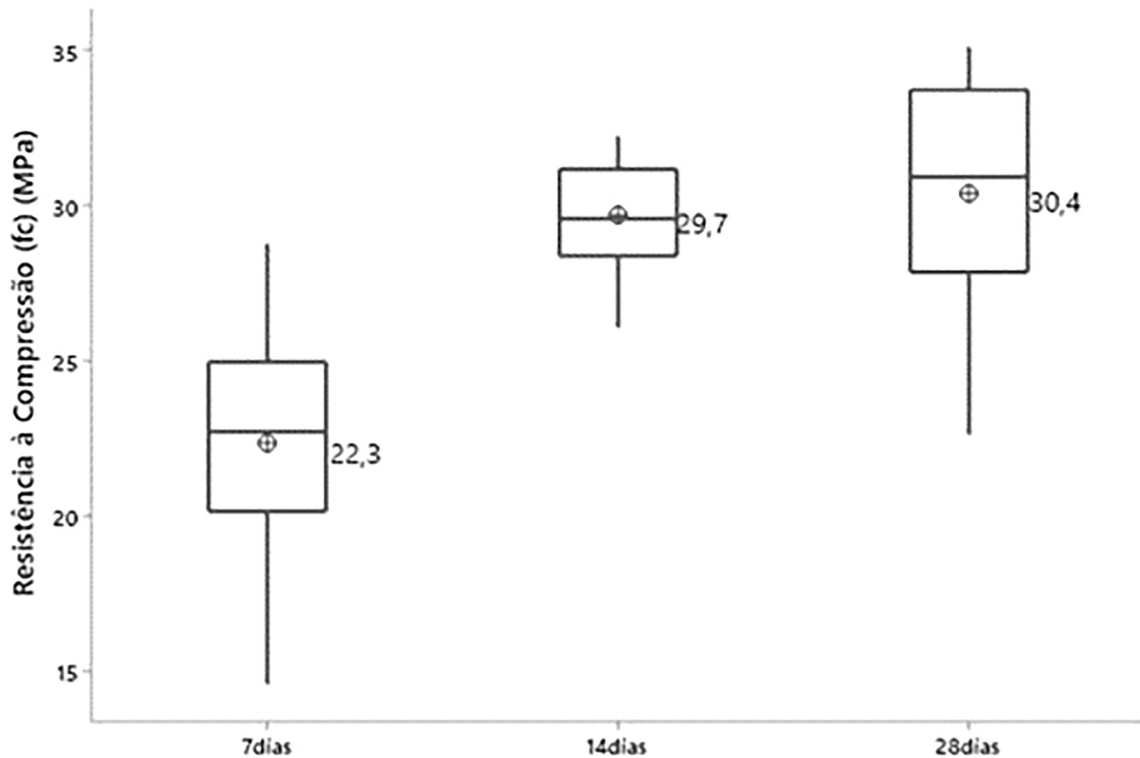


Figura 16: Relação média e desvio padrão da resistência à compressão (fc) obtida pelo MDC.

Na Figura 17, apresenta-se o histograma dos resultados da resistência à compressão (fc), obtida pelo MDC, para a idade de 28 dias, sendo possível observar a presença de assimetria negativa na distribuição dos resultados, com uma tendência de distribuição de probabilidade do tipo extrema. No entanto, considerando o procedimento normalizado de determinação da resistência característica do concreto, pode-se afirmar que o concreto estudado possui um $f_{ck} = 24,8$ MPa.

Analisando os resultados do MNDU (Figura 18), pode-se observar uma maior dispersão e presença significativa de outliers para o concreto com a idade de 7 dias, possivelmente devido à incipiência da matriz do concreto. Com a evolução da cura, nas idades de 14 e 28 dias, pode-se observar mais congruência nos valores da VU. Aos 28 dias os resultados apresentaram baixa dispersão amostral, reduzindo a incerteza da estimação, comportamento similar ao obtido em outros estudos.

Pode-se também observar, na análise de regressão linear (Figura 19) que existe um comportamento crescente entre a resistência à compressão do concreto (fc) e a velocidade de propagação da onda mecânica no material (VU), podendo ser expressa pela equação 2.

$$f_c = 0,016.VU - 42,5 \tag{2}$$

Onde: f_c - resistência à compressão do concreto (MPa); - velocidade de propagação do som no material (m/s).

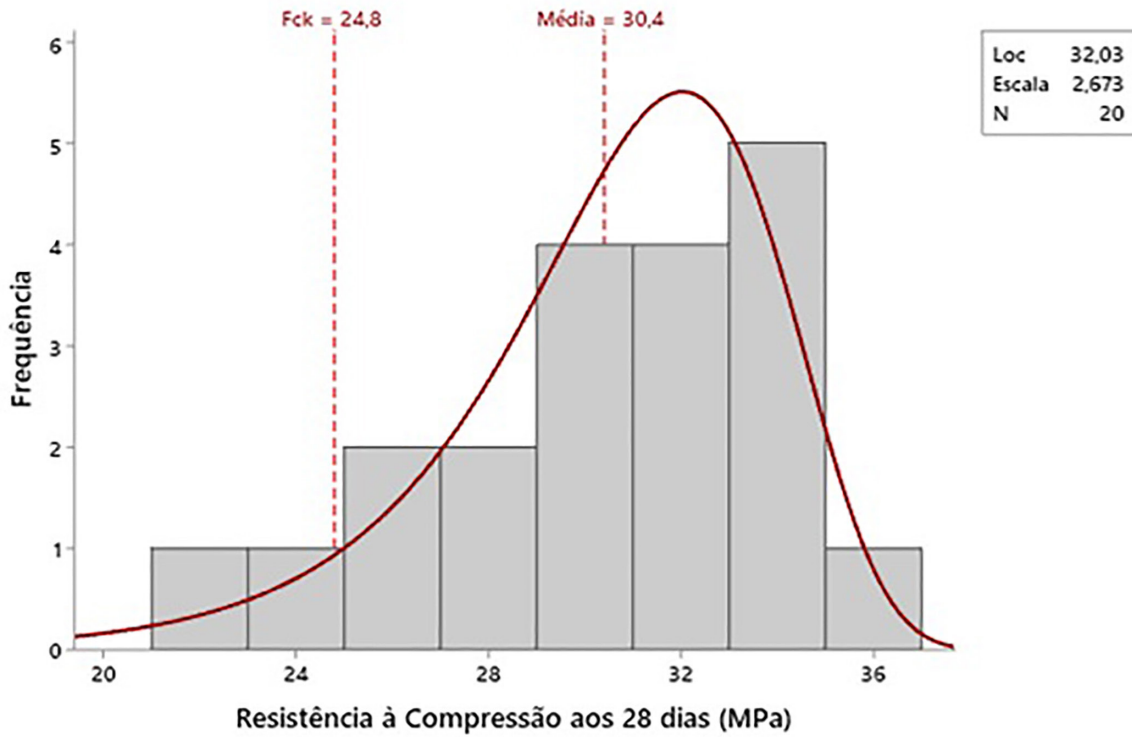


Figura 17: Histograma da resistência à compressão (f_c) aos 28 dias obtida pelo MDC.

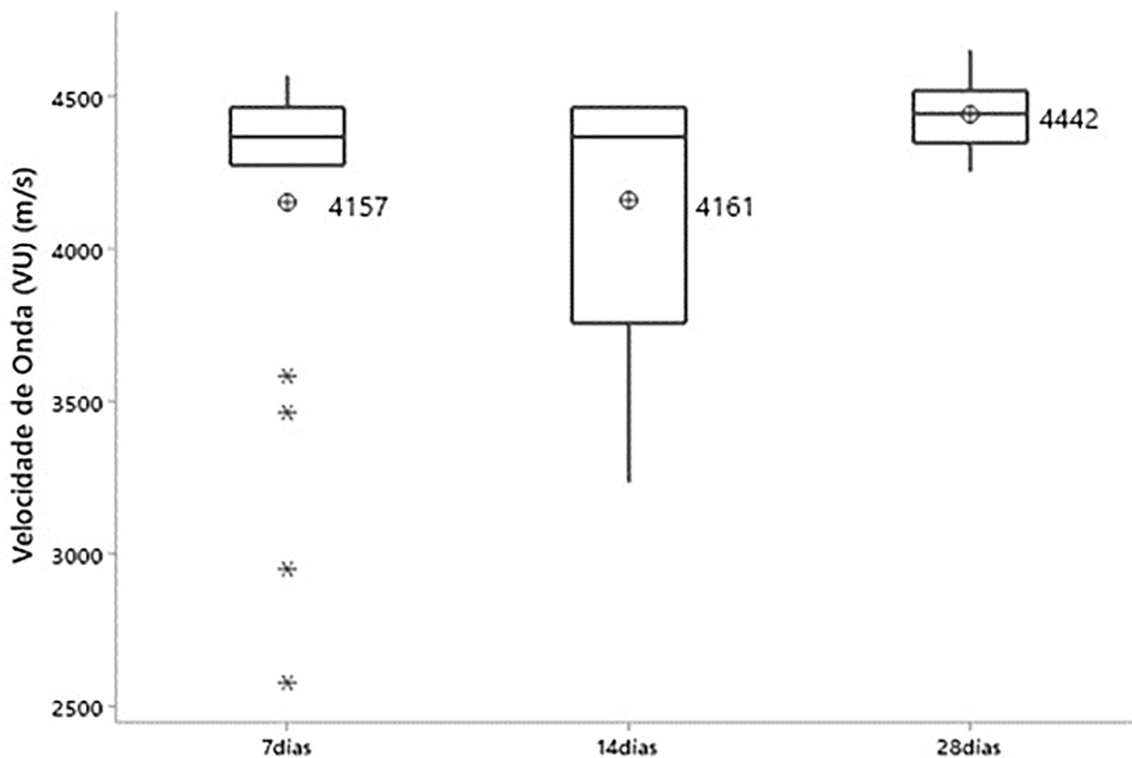


Figura 18: Relação média e desvio padrão da velocidade de onda (VU).

Como pode-se observar, velocidades de propagação (VU) na casa de 4500 m/s, indica resistência à compressão do concreto (f_c) de 30 MPa, valor este muito parecido com o apresentado na Figura 17. Dessa forma, considerando o desvio padrão amostral da VU, obtido no ensaio aos 28 dias ($\sigma_{VU} = 92,2$ m/s), o valor esperado

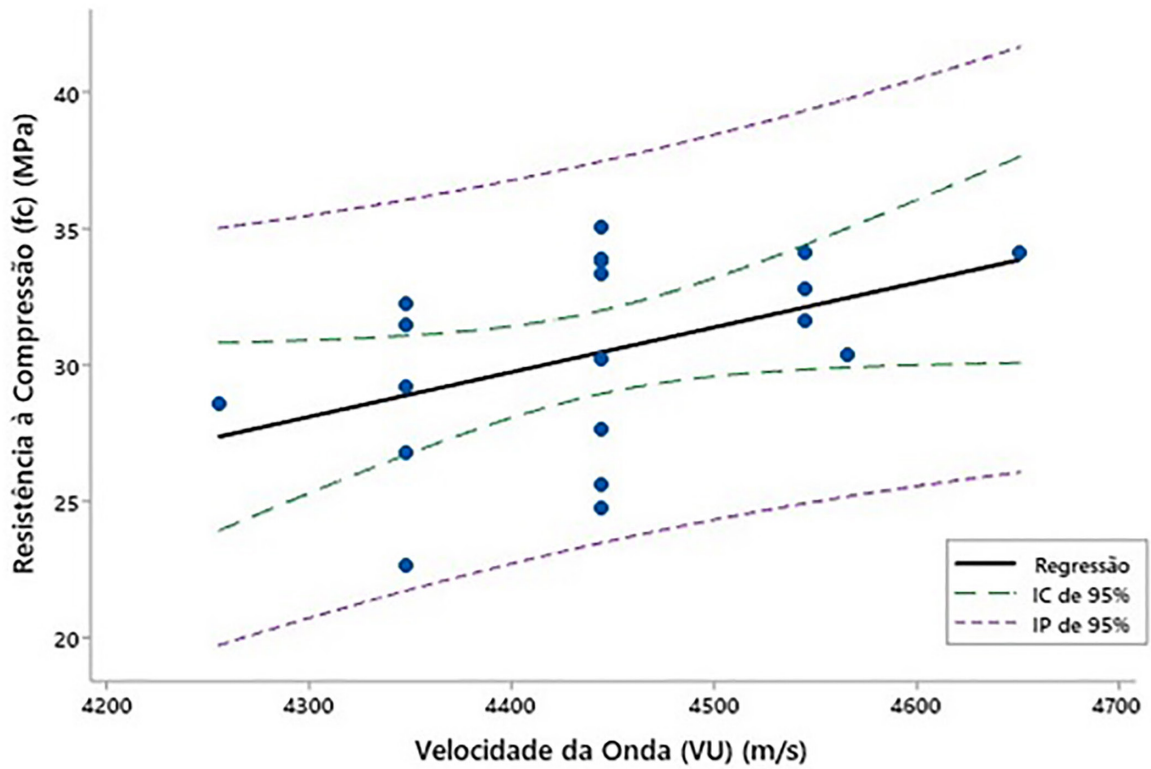


Figura 19: Análise de regressão da resistência à compressão (f_c) aos 28 dias com a velocidade de propagação da onda (VU).

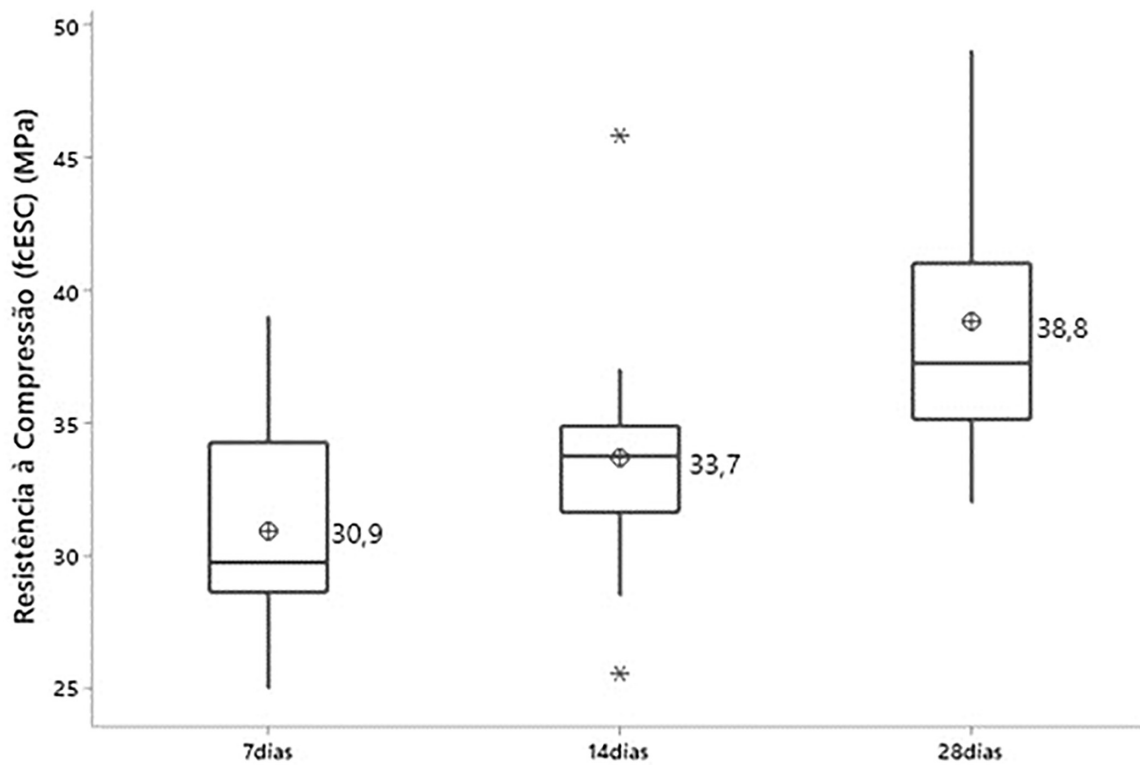


Figura 20: Relação média e desvio padrão resistência esclerométrica (f_{cESC}).

para a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), com 95% de confiança, seria de 25,6 MPa, muito próximo ao resultado obtido pelo MDC.

Considerando a possibilidade de extrapolação da reta de regressão (Figura 19) e a manutenção do mesmo padrão de dispersão dos resultados, pode-se estimar que, para uma resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) de 30 Mpa, seria necessária uma média de propagação da velocidade do som (VU) na casa de 4700 m/s.

Por fim, a Figura 20 apresenta a análise dos resultados do MNDE, que indicam uma crescente da resposta média de resistência à compressão esclerométrica ($f_{c_{ESC}}$) com a evolução da idade de cura. Da mesma forma que os autores estudados percebeu-se também uma maior distorção dos resultados para este método.

Com o objetivo de corrigir os resultados obtidos pelo MNDE ($f_{c_{ESC}}$) em função da resistência à compressão obtida pelo MDC (f_c), pode-se propor o modelo de regressão linear da Figura 21, sendo descrita pela Equação 3.

$$f_c = 0,372 \cdot f_{c_{ESC}} + 14,8 \tag{3}$$

Onde: f_c - resistência à compressão experimental do concreto, estimada pelo MDC (MPa); $f_{c_{ESC}}$ - resistência à compressão do concreto, estimada pelo MNDE (MPa).

Portanto, o f_{ck} estimado pelo MNDE, após o ajuste dos resultados pela equação 3, é de 24,2 MPa. Dessa forma, todos os métodos, apresentaram f_{ck} aos 28 dias na casa de 25 MPa. Cabe ressaltar que os resultados diretos obtidos pelo MNDE, sem correção de valores, resultaria em um f_{ck} aos 28 dias de 28,8 MPa, isto é, 9% superior.

Na Figura 22, apresenta-se um comparativo entre os resultados médios e o desvio padrão, obtidos pelos três métodos estudados, para as idades de cura de 7, 14 e 28 dias. É possível verificar que o MNDE e MDC, apresentam resultados médios bem semelhantes, sendo o desvio padrão dos resultados relativamente pequeno para 28 dias. De forma semelhante aos resultados apresentados na Figura 11, o MNDE tendeu a apresentar superestimação no valor da resistência à compressão (f_c). tais resultados poderiam ser melhorados considerando o ajuste proposto pela equação 3, que indicam que $f_c \cong 65\% f_{c_{ESC}}$.

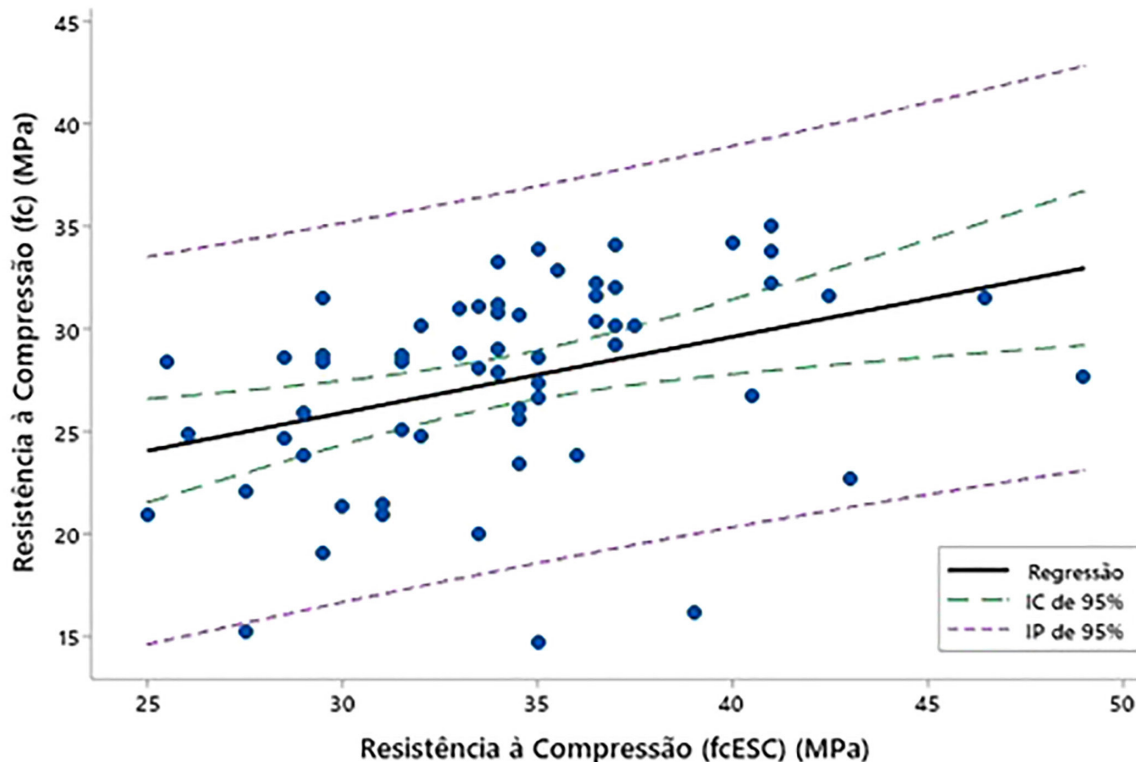


Figura 21: Análise de regressão resistência do concreto medida pelo MDC (f_c) e a resistência medida pelo MNDE ($f_{c_{ESC}}$).

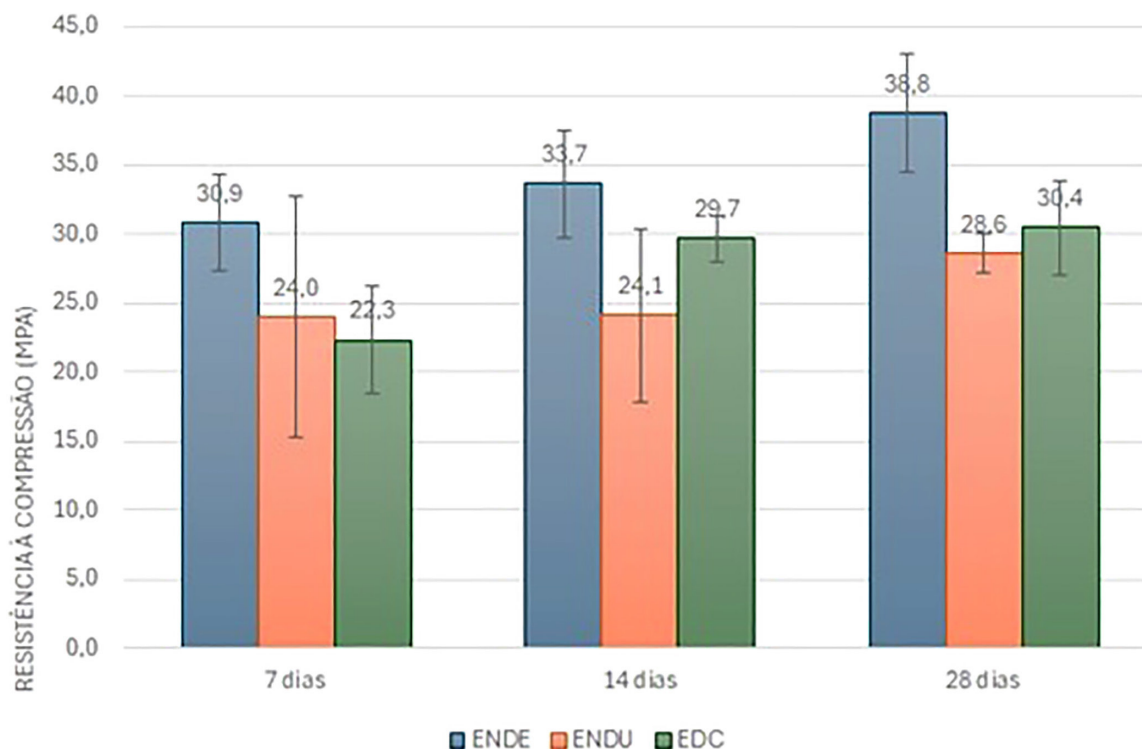


Figura 22: Análise dos resultados média à compressão medida pelos três métodos nas três idades.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo estudar a possibilidade de aplicação dos ensaios não destrutivos de ultrassom e de esclerometria para a avaliação da resistência à compressão do concreto, confrontando-os com os resultados obtidos pelo ensaio destrutivo de convencional.

No estudo, foram apresentados, além da revisão bibliográfica, os resultados do programa experimental que envolveram a moldagem de corpos de prova de concreto de resistências à compressão característica aos 28 dias de aproximadamente 25 MPa, nos quais foram realizados os ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica e esclerometria, sendo estes últimos relacionados com a resistência à compressão obtida pelo ensaio de compressão convencional.

O ENDU demonstrou precisão, principalmente para o concreto com 28 dias de idade, com uma dispersão significativa para idades menores.

Além disso, as análises dos resultados da relação entre VU e f_c sugerem, com 95% de confiança, que, para valores de VU acima de 4500 m/s, a resistência característica do concreto (f_c) estudado seria de 25 MPa. A análise de regressão também mostrou que, a VU esperada, para um concreto de resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa, deve ser superior a 4700 m/s.

No caso do MNDE, a análise geral dos valores sugere que o ensaio de avaliação da dureza superficial, por meio do esclerômetro de reflexão, superestimou a resistência característica à compressão do concreto ($f_{c_{ESC}}$). Os resultados também indicaram que, para 95% de confiança, os resultados médios do ensaio esclerométrico ($f_{c_{ESC}}$) de 46 MPa representam um f_{ck} de 30 MPa, enquanto, $f_{c_{ESC}}$ de 38 MPa correspondia a cerca de f_{ck} convencional de 25 MPa.

Como pode-se perceber os resultados encontrados apresentam coerência técnica e científica, demonstrando possibilidade de utilização dos métodos não destrutivos como alternativa para aferição indireta da qualidade em linhas de pré-moldados, sendo que senão eliminado totalmente, mas reduzindo a demanda por ensaios destrutivos. Naturalmente, para isso, estudos complementares são necessários, principalmente com o objetivo de melhor aferir o modelo através de uma maior representatividade amostra.

Por fim, essas descobertas são contribuições valiosas para os estudos que a compreensão e avaliação da qualidade do concreto em diferentes contextos e podem contribuir para a tomada de decisões na engenharia civil, indicando a possibilidade de automação da aferição da qualidade de artefatos de concreto e estruturas pré-fabricadas, reduzindo ou eliminando por completo os ensaios destrutivos da planta fabris.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] RIBEIRO, C.C., PINTO, S.J., STARLING, T., *Materiais de construção civil*, 4 ed., Belo Horizonte, UFMG, 2013.
- [2] HELENE, P., PACHECO, J., *Controle da resistência do concreto*, México, Alconpat Int., 2013.
- [3] BASTOS, P.S., *Fundamentos do concreto armado*, Bauru, UNESP, 2011.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 5738: Concreto – Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova. Versão corrigida: 2016*, Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- [5] SANTOS, E.B., ISMAIL, I.A.L., “Corpo de prova de concreto: a reutilização do resíduo sólido *in loco*”, *Revista Científica Integrada*, v. 5, n. 3, pp. 1–8. <https://www.unaerp.br/revista-cientifica-integrada/edicao-atual/4904-rci-corpodeprovadeconcreto-06-2022/file>, acessado em junho de 2023.
- [6] ADAMATTI, D.S., LORENZI, A., CHIES, J.A., *et al.*, “Análise de estrutura de concreto armado através da velocidade de propagação do pulso ultrassônico: estudo de parâmetros tecnológicos intervenientes”, *Revista IBRACON de Estrutura e Materiais*, v. 10, n. 2, pp. 358–385, 2017. doi: <http://doi.org/10.1590/S1983-41952017000200006>.
- [7] CHIES, J.A., “*Ensaio não destrutivo em concreto: detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com o uso de ultrassom*”, Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014.
- [8] CARVALHO, E., SENA, C., ROCHA, M., *et al.*, “*Utilização de ensaios não destrutivos, ultrassom e pacômetro, como métodos de verificação da resistência e qualidade do concreto em um edifício em Aracaju - Sergipe*”, *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 2, n. 3, pp. 31–33, 2017. doi: <http://doi.org/10.25286/rep.v2i3.682>.
- [9] SCHIAVON, K.B., “*Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto*”, Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2015. doi: <http://doi.org/10.11606/D.18.2015.tde-14082015-091127>.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*, Rio de Janeiro, ABNT, 2019.
- [11] GODINHO, J.P., DE SOUZA JUNIOR, T.F., MEDEIROS, M.H.F.A., *et al.*, “Influência do tipo de cimento, da idade de cura e da umidade dos corpos de prova de concreto nas leituras de velocidade de propagação de onda ultrassônica”, In: *3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado*, São Carlos, 22–24 Agosto 2018.
- [12] ESCOBAR, C.J., CRUZ, D.A., FABRO, G., “*Avaliação de desempenho do ensaio de esclerometria na determinação da resistência do concreto endurecido*”, In: *Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto*, São Paulo, 2011.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de Corpos de Prova Cilíndricos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 12655:2015 Concreto de Cimento Portland — Preparo, Controle, Recebimento e Aceitação — Procedimento*, Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- [15] LORENZI, A., REGINATO, L.A., LORENZI, L.S., *et al.*, “Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto”, *Revista de Engenharia Civil IMED*, v. 3, n. 1, pp. 3–13, 2016. <http://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v3n1p3-13>.
- [16] ANDREUCCI, R., [https://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20\(1\).pdf](https://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20(1).pdf), acessado em abril de 2023.
- [17] ADAMATTI, D.S., “*Propagação da velocidade de pulso ultrassônico na análise de estruturas de concreto armado: estudos de parâmetros tecnológicos intervenientes*”, Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, 2013.
- [18] PUNDIT LAB, https://media.screeningeagle.com/asset/Downloads/Pundit%20Lab_Operating%20Instructions_Portuguese_high.pdf, acessado em abril de 2023.
- [19] TRTNIK, G., KAVCIC, F., TURK, G., “Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks”, *Ultrasonics*, v. 49, n. 1, pp. 53–60, 2009. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.05.001>. PubMed PMID: 18589471.
- [20] LORENZI, A., “*Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação de pulso ultra-sônico*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2009.

- [21] 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. 3, pp. 7–11, 2021. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13047>.
- [22] MOHAMAD, G., CARMO, P.I.O., OLIVEIRA, M.J.D., *et al.*, “Métodos combinados para a avaliação da resistência de concretos”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 20, n. 1, pp. 83–99, 2015. doi: <http://doi.org/10.1590/S1517-707620150001.0011>.
- [23] EVANGELISTA, A.C.J., “*Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não-destrutivos*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- [24] GODINHO, J.P., DE SOUZA JUNIOR, T.F., MEDEIROS, M.H.F., *et al.*, “Fatores de influência na velocidade de pulso ultrassônico no concreto”, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 13, n. 2, pp. 222–247, 2020. doi: <http://doi.org/10.1590/s1983-41952020000200004>.
- [25] FORIGO, C., LOPES, Y.D., VANALLI, L., “Determinação da resistência à compressão do concreto exposto a altas temperaturas pelo método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas”, *Revista HOLOS*, v. 7, pp. e9904, 2021.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7584: Concreto Endurecido – Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão – Método de Ensaio*, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- [27] SPÍNDOLA, G.M., CASCUDO, O., “Avaliação do Concreto Estrutural de pilares utilizando ensaios não destrutivos em comparação com resultados do controle tecnológico”, In: *Congresso Brasileiro do Concreto*, pp. 3–26, Goiás, 2017.
- [28] SOUZA, D.J., DE LA TORRE, E.M., KOSLOSKI, F., *et al.*, “Obtenção da resistência à compressão do concreto de viadutos localizados na região de Curitiba por métodos de ensaios não destrutíveis: esclerometria e ultrassom”, In: *44ª Reunião Anual de Pavimentação e 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária*, Foz do Iguaçu, agosto de 2015.
- [29] PAIVA, M.V., FREITAS, M.V.P., SOARES, C.E., “Uma revisão bibliográfica dos fatores de influência no ensaio esclerométrico”, *Revista JCEC*, v. 7, n. 1, pp. 1–9, 2021. doi: <http://doi.org/10.18540/jcecv17iss-1pp12100-01-09e>.