

ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DE CONCRETO ESTRUTURAL ATRAVÉS DA VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO*

Thais Eloy Guimarães Nascimento¹

Iris Sterfanie Santos¹

Ana Larissa Cruz Prata¹

Renan Praciano Ideburque Leal Sandes²

Carlos Otávio Damas Martins³

Sandro Griza⁴

Resumo

Na construção civil, o concreto é um material amplamente utilizado para execução de elementos estruturais. Com isso, tem-se atualmente uma atenção quanto ao conhecimento de seu estado de deterioração e segurança. Com base nisso, a busca por métodos que permitam avaliar as estruturas é crescente. Nesse contexto, os ensaios não destrutivos (END'S) são de suma importância para avaliar o desempenho das estruturas, através do diagnóstico de problemas e controle da qualidade, que influenciam no desempenho das edificações em concreto, além de ser uma técnica não destrutiva, que conserva o presente estado da estrutura. O presente artigo destaca a importância do uso da técnica de ultrassom, ensaio não destrutivo de emissão de ondas ultrassônicas, na análise qualitativa e quantitativa de pilares em concreto armado comparando-o com os resultados obtidos no rompimento de corpos de prova por compressão axial, de uma edificação residencial vertical localizada em Aracaju SE. Os resultados apontam a eficiência da técnica ultrassônica. O concreto, de modo geral, apresentou compacidade e o método indireto para obtenção da resistência a compressão e módulo de Young se mostrou promissor em relação ao método direto.

Palavras-chave: Concreto estrutural; Ensaio não destrutivo; Ultrassom; Propriedades mecânicas.

QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ANALYSIS OF STRUCTURAL CONCRETE THROUGH THE ULTRASSONIC PULSE SPEED

Abstract

In civil construction, concrete is a material widely used for the execution of structural elements. With this, we are currently paying attention to the knowledge of its state of deterioration and safety. Based on this, the search for methods that allow to evaluate the structures is growing. In this context, non-destructive tests (NDTs) are of paramount importance to evaluate the performance of structures, through the diagnosis of problems and quality control, which influence the performance of concrete buildings, besides being a non-destructive technique that preserves the present state of the structure. The present article highlights the importance of the use of ultrasonic equipment, non-destructive ultrasonic wave emission test, in the qualitative and quantitative analysis of columns in reinforced concrete, comparing it with the results obtained in the breaking of test specimens by axial compression, a vertical residential building located in Aracaju SE. The results indicate the efficiency of the ultrasonic technique. The concrete, in general, presented compactness and the indirect method to obtain the compressive strength and Young's modulus showed to be promising in detriment to the direct method.

Keywords: Structural concrete; Non-destructive testing; Ultrasound; Mechanical properties.

¹ Engenheira Civil, Mestranda em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil.

² Engenharia Eletrônica, Graduando, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil.

³ Engenheiro de Materiais, Pós-Doutor em Tecnologia de Materiais, com ênfase em Ensaios não Destrutivos e Inspeção, Professor Adjunto C, Departamento de Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil

⁴ Engenheiro Mecânico, Dr. em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Professor Associado II, Departamento de Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos apresentaram crescimento nos últimos anos [1] com ampla utilização na indústria petroquímica, aeronáutica, eletromecânica e na construção civil [2] [3] [4]. Na engenharia civil a utilização dos ensaios ainda é limitada e as dificuldades estão relacionadas a necessidade de conhecimento multidisciplinar, interpretação dos resultados e literatura incipiente sobre problemas relacionados a construção [3].

Os ensaios não destrutivos são importantes para realização de inspeção e manutenções, que, apesar das dificuldades enfrentadas pelo setor [3], possibilitam examinar, testar ou avaliar qualquer objeto sem que seja necessário alterar suas características ou forma [1]. Essa característica não destrutiva é a principal vantagem na realização de ensaios quando comparados aos ensaios destrutivos, que utilizam, por exemplo, extração de testemunho, para avaliação de propriedades físicas ou químicas. Além da característica não invasiva, o método não destrutivo proporciona a recorrência dos ensaios em um mesmo elemento estrutural, que traduzem na confiabilidade dos resultados.

Na indústria da construção o material utilizado mundialmente é o concreto. Ele é uma mistura heterogênea composta basicamente por cimento, água, agregados miúdos e graúdos e, para melhorar suas propriedades, pode ser adicionado aditivos e reforço com aço. Por ser um material heterogêneo e complexo, inúmeras variáveis precisam ser observadas para garantir seu desempenho estrutural, como a relação água/cimento, granulometria do agregado, tipo do cimento, tempo de cura e porosidade [5].

Para avaliar as propriedades do concreto e garantir o controle de qualidade, são dispostos em norma e literatura uma variedade de ensaios em função do objetivo da análise, como teste por penetração de íons cloreto, impacto, absorção de água e ensaio de resistência a compressão [4]. O ensaio de compressão axial é um dos ensaios mais difundidos e utilizados na construção civil para monitorar qualidade e desempenho do concreto, visto que a resistência a compressão é uma das principais características apresentadas pelo concreto [4].

Além do método convencional de ensaio a compressão por ruptura, seja através da confecção dos corpos de prova ou extração de testemunhos, outras técnicas não destrutivas estão sendo avaliadas e utilizadas com mesmo propósito, como por exemplo, a aplicação do ultrassom. O pulso ultrassônico pode ser aplicado como um método para avaliar a estrutura, pois é possível correlacionar resistência a compressão com a densidade do material e constantes elásticas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) [2] [3]. Desse modo, é possível analisar a compacidade do concreto e identificar regiões heterogêneas [2], bem como calcular o módulo de elasticidade, resistência a compressão e coeficiente de Poisson [4] [6] [7].

De acordo com a ACI-228.2R-13 [8], de forma qualitativa, o ensaio de ultrassom pode auxiliar no controle de qualidade de novas construções, detecção de problemas, avaliação das condições do concreto e garantia na qualidade de reparos no concreto. A aferição da velocidade é realizada através do posicionamento de

transdutores na superfície da estrutura acoplados com gel. A medição pode ser realizada de forma indireta, direta e semidireta [6]. Na medição direta o pulso é transmitido em um ângulo reto até a face do receptor, sendo considerado o método mais satisfatório e preciso, pois seu caminho é claramente definido, utilizado sempre que possível para avaliar a qualidade do concreto [6].

Na medição semidireta os transdutores são posicionados a um ângulo de 90° em relação ao outro. Nesse método, se o ângulo entre os transdutores e comprimento para a onda percorrer não for muito grande pode ser considerado satisfatório, porém a sensibilidade será menor que o método direto e se os critérios de distância não forem seguidos o sinal pode não ser claro e a leitura inviabilizada [6]. O método indireto é o menos satisfatório com amplitude reduzida em relação aos demais. Além disso, o sinal pode ser disperso devido a descontinuidades. A velocidade do pulso fica condicionada a zona de superfície do concreto o que pode não ser representativo do elemento e o caminho da onda é incerto [6].

A velocidade do pulso ultrassônico (VPU) é uma das técnicas não destrutivas mais utilizadas para medir propriedades mecânicas do concreto [3] [9]. A técnica permite medir o tempo que um pulso ultrassônico leva para percorrer uma distância conhecida e através da velocidade do pulso é possível determinar as condições e uniformidade do concreto [8]. A velocidade de propagação da onda depende da natureza do material, porosidade, presença de vazios, água nos poros [10] e outros fatores como a condição da superfície e composição do concreto [3].

Os resultados das velocidades obtidos através do ultrassom podem ser indicativos da qualidade do concreto e categorizados de acordo com os índices disposto da International Atomic Energy Agency-2002 (Tabela 1) [2].

Tabela 01. Índices estimativos da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica

Velocidade de propagação linear (m/s)	< 4500	3500 a 4500	3000 a 3500	2000 a 3000	> 2000
Qualidade do concreto	ótimo	ótimo / bom	bom	regular	ruim

Fonte: [2]

A resistência e a compacidade de estruturas de concreto foram analisadas em dois estudos desenvolvidos por Lorenzi e colaboradores [11] através dos resultados da VPU. O primeiro estudo de caso verificou pilares quando o controle do concreto apontou deficiência de resistência nos corpos de prova. As VPU foram mapeadas graficamente e gerada curvas de nível para obter estimativa da homogeneidade e da presença de defeitos em cada pilar. Neste estudo de caso as leituras ultrassônicas foram favoráveis a condição estrutural do pilar, e não houve necessidade de nenhuma intervenção destrutiva na obra em análise. O segundo estudo de caso foi realizado em *deck* de uma ponte de concreto com presunção de existência de vazios. O ensaio de ultrassom foi empregado para detectar mudanças de compacidade no concreto e, após mapeamento das VPU, concluiu-se que não havia vazios de grande dimensão que pudessem comprometer o funcionamento da estrutura.

Com relação a abordagem quantitativa da técnica de ultrassom, apesar da heterogeneidade produzida pelos agregados influenciar incisivamente na

propagação das ondas, a depender da frequência que esteja sendo estudada [9], ela é ainda uma técnica vantajosa para calcular a resistência a compressão na indústria da construção [4] e então, estimar propriedades do concreto endurecido [7]. A obtenção da resistência através da VPU para um meio elástico, homogêneo e isotrópico pode ser calculada de forma indireta através do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) (Pa) (Equação 1) [HAACH] [6].

$$V = \sqrt{\frac{K \cdot E_d}{\rho}} \text{ (m/s) onde } K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (1)$$

O valor de K é insensível a variação do coeficiente de Poisson dinâmico (ν). Sendo assim, a partir de uma estimativa razoável do coeficiente e da densidade (ρ) (kg.m^{-3}) é possível calcular o módulo de elasticidade utilizando os valores de velocidade de onda obtidos durante o ensaio com ultrassom [6]. Os valores de coeficiente e densidade de material compósito com agregados naturais variam pouco, então a relação velocidade e módulo pode ser consistente e confiável desde que obedeça a um intervalo de 10% de variação [6].

O coeficiente de Poisson para o concreto geralmente varia entre 0,15 e 0,22 [5] [12] e não apresenta indícios de estar relacionado a relação água/cimento, tempo de cura e granulometria do agregado, porém costuma ser menor em concreto de alta resistência (>40 MPA) e maior para concreto saturado e concreto carregado dinamicamente [5]. A densidade para concreto normal estrutural varia de 2000 a 2800 kg.m^{-3} [13], onde o valor médio para um concreto contendo areia natural e pedra britada é de 2400 kg.m^{-3} [5].

O módulo de elasticidade informa sobre a rigidez do material, pois é a relação linear entre tensão e deformação. Apesar do concreto não apresentar comportamento linear, estimar o módulo de elasticidade é essencial para determinar as tensões causadas pelas deformações e para calcular a tensão de projeto [5]. O módulo de elasticidade pode ser estático ou dinâmico. O módulo de elasticidade dinâmico condiz com uma deformação instantânea muito pequena, sendo geralmente 30% maior que o módulo estático para concreto de média resistência [5]. O módulo de elasticidade estático, usado em projeto, costuma ser estimado a partir de expressões empíricas com relação direta entre módulo, resistência a compressão aos 28 dias e densidade [5]. Caso a resistência a compressão média não for conhecida, ela pode ser substituída pela resistência característica a compressão ($f_{ck} + 8$) [5].

Quando são utilizados os valores de velocidade para calcular o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) é possível calcular o módulo de elasticidade estático médio (E_{cm}) (GPa) (Equação 2) e através deste pode ser calculada a resistência a compressão (f_c) (MPa) (Equação 3) [14]. As Equações 2 e 3 foram obtidas a partir de cálculos empíricos para concreto convencional [14], ou seja, desenvolvidas para concreto com resistência a compressão na faixa de 30 a 60 MPa [12].

$$E_{cm} = 1,25E_d - 19 \quad (2)$$

$$E_{cm} = 9500 * (f_c)^{1/3} \quad (3)$$

Tsioulou e colaboradores [14] calcularam os valores de resistência e módulo a partir das Equações 2 e 3 para concreto com e sem fibra de aço. Eles adotaram ν de 0,20

e densidade aferida a partir de medições experimentais com 2187 kg.m^{-3} para o concreto sem fibra e 2244 kg.m^{-3} e 2357 kg.m^{-3} para concreto com 1% e 3% de fibra de aço, respectivamente. Os autores concluíram que o módulo de elasticidade estático não pode ser obtido com precisão. A Equação 2 foi calculada empiricamente e a aplicação do modelo teórico da Equação 1 com o modelo empírico (Equações 2 e 3) resultaram em valores de resistência a compressão teórico inferiores a metade dos valores experimentais.

Abdicando da teoria elastodinâmica e do modelo empírico com base no concreto convencional, Tsioulou e colaboradores [14] combinaram as técnicas não destrutivas de esclerometria e ultrassom e testes mecânicos de tração e compressão e avaliaram propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibra de aço e sem fibra. As equações para o concreto sem adição de fibra obtidas a partir dos ensaios resultaram em coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,80 analisados com regressão linear e exponencial para VPU e esclerometria, onde a regressão exponencial mostrou maior confiabilidade [14].

A resistência a compressão apresentou coeficiente de determinação 1,00 quando realizado com VPU e 0,95 com a esclerometria, ambos em regressão exponencial [14]. O módulo de elasticidade, por sua vez, apresentou coeficiente de determinação superior utilizando a esclerometria em relação a VPU, com 0,94 e 0,82, respectivamente [14]. As equações, referentes ao concreto sem fibra, obtidas através da regressão exponencial possibilitam calcular a resistência a compressão (MPa) e o módulo de elasticidade (GPa) com a VPU (m/s) de forma direta (Equação 4 e 5).

$$f_c = 0,06007e^{0,00162V_p} \quad (4)$$

$$E_d = 0,1143e^{0,0012V_p} \quad (5)$$

Hassan e colaboradores [12] investigaram propriedades mecânicas de concreto reforçado com fibra de alto desempenho através das técnicas ultrassônica e ressonância. Os autores obtiveram que aos 28 dias o teste mecânico estático revelou f_c de 150 MPa, E de 46 GPa e ν de 0,21 e os testes dinâmicos para VPU revelaram E de 48 GPa e ν de 0,24 e as frequências de ressonância E de 51 GPa e ν de 0,20. Os autores concluíram que a técnica de VPU é o método de teste não destrutivo mais confiável, de fácil manuseio e portátil na avaliação das propriedades elásticas do concreto reforçado com fibra de aço.

Diante do que foi exposto, o presente estudo busca analisar pilares de concreto armado com idades distintas através da técnica ultrassônica de forma qualitativa e quantitativa. A abordagem qualitativa está atrelada a análise da qualidade do concreto e sua homogeneidade, já a quantitativa está relacionada a análise de propriedades mecânicas através de VPU utilizada no método indireto com as Equações (1), (2) e (3) e método direto através das Equações (4) e (5), comparando ambos os métodos com o ensaio de rompimento de resistência a compressão com 7 e 28 dias.

2 DESENVOLVIMENTO

O ensaio com ultrassom foi realizado em nove pilares de concreto armado de uma edificação residencial vertical localizada em Aracaju SE (Tabela 2). O equipamento utilizado foi o detector de pulso ultrassônico, modelo Proceq PunditLab+ com 54 kHz. As leituras foram realizadas com ganho do pulso de 10x e amplitude de 250V.

Tabela 2. Indicação dos pilares por idade de concretagem

IDADE	PILAR	DIMENSÃO (cm)
15 dias	P91, P96 e P116	22 x 47
24 dias	P88, P103 e P113	22 x 40; 22 x 47
45 dias	P91, P96 e P116	22 x 47

De acordo com os dados fornecidos pelos gestores da obra, a resistência prevista em projeto é de 35 MPa, cimento CPII-F40, uso de aditivo polifuncional e consumo de cimento de 400 kg.m⁻³. A densidade do concreto foi adotada em 2400 kg.m⁻³ e o coeficiente de Poisson de 0,20.

No ensaio de ultrassom, as leituras da VPU foram realizadas através do método direto nas duas faces opostas do pilar, cuja distância foi 22 cm. Antes das leituras o equipamento foi calibrado e realizada a identificação das armaduras dos pilares com o auxílio de um pacômetro manual da marca Proceq e então demarcados os grids. Em cada pilar, foram marcados quatro grids a 1,50 m de altura em relação ao piso. Em cada grid, foram realizadas cinco leituras, totalizando 20 leituras por pilar e 60 leituras para cada idade de concretagem.

Após realização dos ensaios os resultados foram analisados estatisticamente. Os valores médios de VPU para cada grid foram utilizados para calcular resistência a compressão e módulo de elasticidade para o método indireto através das Equações 1, 2 e 3 para concreto convencional e para o método direto utilizou-se as Equações 4 e 5. Os valores obtidos foram comparados com a resistência a compressão mecânica, fornecida pela empresa construtora.

A qualidade do concreto, analisada com base na velocidade e correlacionada com os parâmetros da Tabela 1 [2], foi considerada ótima/boa independentemente da idade de concretagem, pois os valores de velocidade média ficaram no intervalo de 4100-4300 m.s⁻¹.

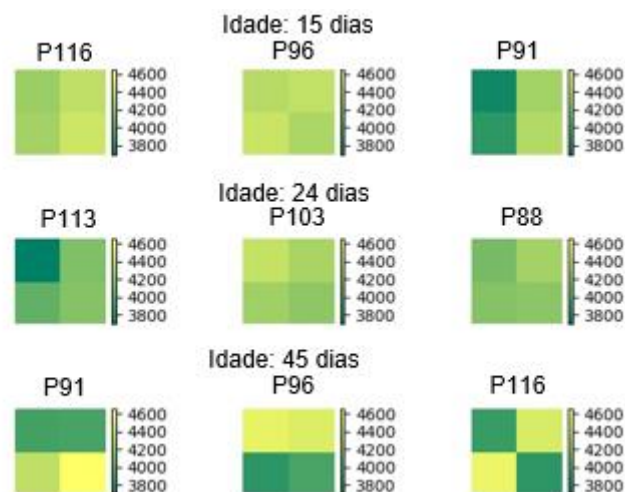


Figura 1. Diagrama de uniformidade dos dados de VPU com diferentes idades de concretagem.

Os pilares com concretagem de 45 dias apresentaram desvios de velocidade relativamente altos ($\pm 360 \text{ m.s}^{-1}$) em relação as demais com idade de 15 e 24 dias ($\pm 135 \text{ m.s}^{-1}$), apresentando-se heterogêneos (Figura 1). Contudo, não se pode afirmar que a qualidade do concreto foi comprometida devido a sua heterogeneidade, pois os valores de velocidade permaneceram dentro do parâmetro de qualidade, variando de $3700\text{-}4700 \text{ m.s}^{-1}$ para todas as idades de concretagem (Figura 2).

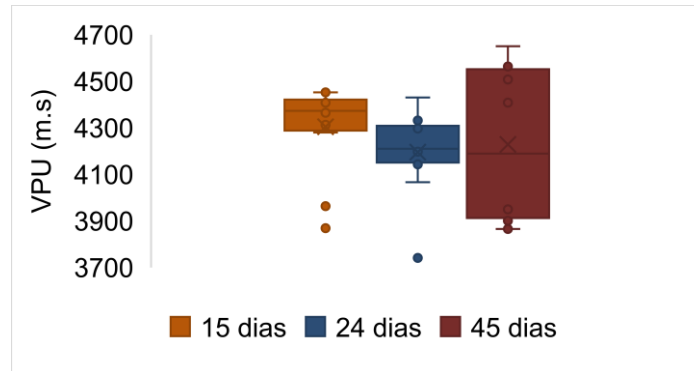


Figura 2. Valores médios e intervalos de confiança dos dados de VPU com diferentes idades de concretagem

As propriedades mecânicas calculadas de forma indireta e direta apresentaram alta variação de módulo de Young e resistência entre os métodos (Figura 3). O cálculo de forma indireta (A) resultou em valores de módulo de elasticidade estático inferior ao dinâmico na ordem de até 30%, de acordo com o estimado para o módulo de deformação do concreto de resistência média [5]. O que se observa a partir do modelo empírico (A) associado a VPU são módulos de elasticidade dinâmico de $39,05 \text{ GPa}$ em média e resistência a compressão de $33,74 \text{ MPa}$ em média.

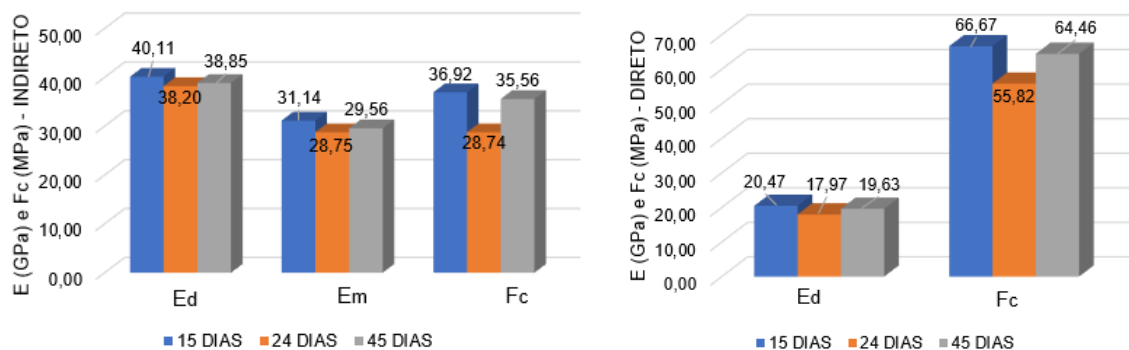


Figura 3. Comparativo dos métodos de (A) cálculo indireto e (B) direto de resistência a compressão e módulo de elasticidade com diferentes idades de concretagem

A resistência a compressão calculada através do método indireto para 15 e 45 dias atingiu a resistência de projeto, mas com 24 dias o valor foi inferior ao estimado pelo projetista, de 35 MPa . A baixa resistência a compressão estimada aos 24 dias pode estar relacionada ao fato do cálculo utilizado ser atrelado a VPU e aos 24 dias foi registrado a menor média de velocidade, justificando o decréscimo da resistência. O método direto resultou em resistência a compressão média de $62,32 \text{ MPa}$ e módulo de elasticidade de $19,36 \text{ GPa}$, isto é, uma diferença para mais e para menos 50%, respectivamente, em relação ao método indireto.

A idade do concreto, de acordo com os métodos de cálculo, não apresentou relação com as propriedades mecânicas. A ausência de correlação pode ser inconclusiva, visto que os pilares ensaiados foram diferentes, conseqüentemente há alteração nas características do concreto como distribuição dos agregados na mistura, tempo de cura e porosidade induzida pela vibração. As condições de transporte, lançamento e adensamento também influem na VPU e conseqüentemente nas propriedades mecânicas do concreto calculadas de forma direta ou indireta. Em relação aos valores de resistência a compressão de acordo com o ensaio mecânico, houve crescimento na taxa de resistência com o tempo, visto que, tratava-se do mesmo concreto com as mesmas condições de preparação para os corpos de prova (Figura 4).

A resistência a compressão variou de 30,65 para 35,20 MPa com 7 dias e 36,70 para 40,10 MPa para 28 dias, observando baixa taxa de crescimento de resistência (< 5 MPa) (Figura 4). A taxa de crescimento de resistência a compressão no concreto é mais evidenciada nos primeiros dias, devido aos processos de hidratação do cimento e finura de seus grãos [15]. Nos primeiros dias a taxa de liberação de calor é elevado, pois ela está correlacionada a reação de hidratação, elevando a resistência a compressão.

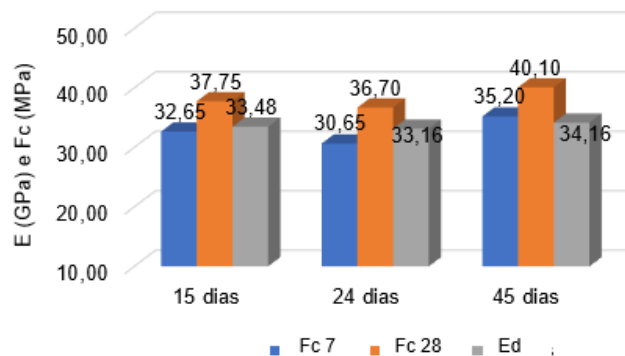


Figura 4. Resistência a compressão mecânica com 7 e 28 dias e estimativa teórica do módulo de elasticidade dinâmico de pilares com diferentes idades

Com relação ao módulo de deformação tangente inicial aos 28 dias, quando este não é obtido através dos ensaios mecânicos, ele pode ser estimado a partir da resistência a compressão média aos 28 dias (Equação 6) [5].

$$E_d = 2,15 \cdot 10^4 \cdot (f_{cm}/10)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

O E_d mecânico médio, com 33,60 GPa, foi similar ao E_d calculado por meio do método indireto, com 39,05 GPa em média, mas cerca de 40% maior que o estimado pelo método direto (19,36 GPa). A comparação dos métodos de cálculo de resistência e módulo de elasticidade com os valores do ensaio mecânico confirmaram que o método indireto apresentou viabilidade para fazer estimativas e afirmativas a respeito das propriedades mecânicas. O método direto, apesar da praticidade para obtenção de propriedades mecânicas através da VPU, não se mostrou indicado.

As formulações de Tsioulou e colaboradores [14], apesar de utilizado apenas as equações para o concreto sem fibra, podem não ter se mostrado pertinentes para a análise das propriedades mecânicas, pois a densidade do concreto para obtenção das fórmulas foi restrita. A densidade é uma variante significativa na relação VPU e propriedades mecânicas e outras variáveis, como agregado e relação água/cimento, por exemplo, podem ter influenciado na VUP e conseqüentemente na obtenção das equações, que induziram equações aplicáveis apenas ao estudo realizados pelos autores.

O método empírico indireto, por sua vez, ampliou as condições de ensaio e limitou apenas a faixa de resistência analisada. Os resultados fornecidos por ambos os métodos de cálculo reforçam a complexidade do concreto e a cautela para estimar resistência a compressão e módulo de elasticidade. A relação resistência a compressão e VPU apresentou coeficiente de correlação significativo ($R^2 > 0,85$), confirmando que o aumento da VPU pode resultar em valores elevados de resistência a compressão (Figura 5).

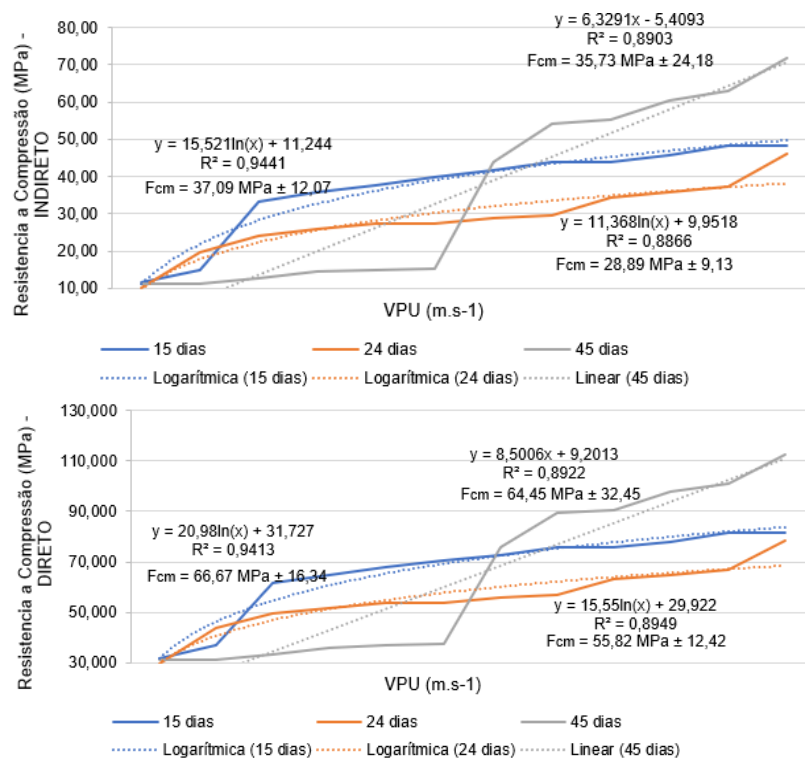


Figura 5. Relação resistência a compressão e VPU através do método indireto e direto com pilares de diferentes idades de concretagem.

As equações obtidas configuram o comportamento que o concreto pode apresentar em função da VPU aferida. A evolução da resistência a compressão com o aumento da VPU apresentou crescimento linear para 45 dias de concretagem e crescimento lento com tendência a estabilização para os concretos com 15 e 24 dias de idade. A diferença na curva com 45 dias em relação as demais pode estar relacionada ao acoplamento dos transdutores na estrutura, visto que na fase de aferição o gel estava pouco fluido. Apesar de esperar que as idades influenciasses na VPU, no estudo em questão não se pode afirmar correlação de tempo com velocidade ou tempo com ganho de propriedades mecânicas, pois as leituras por idade de

concretagem foram realizadas em pilares distintos. O concreto estrutural possui a mesma composição, mas os arranjos no seu interior são distintos e influenciam de forma diferente nas características do material.

3 CONCLUSÃO

A velocidade do pulso ultrassônico aferida nos pilares em concreto armado revelou que a estrutura, de modo geral, é homogênea e o concreto possui condições de uso e desempenho. Os métodos de obtenção da resistência a compressão e módulo de elasticidade (Young) foram representativos apenas para o método indireto, ou seja, as equações empíricas obtidas através do concreto convencional resultaram em valores similares a resistência a compressão mecânica e módulo de elasticidade. A taxa de crescimento da resistência a compressão com a idade de concretagem não aparentou correlação com a VPU e conseqüentemente com as propriedades mecânicas. Para correlacionar a VPU e a taxa de crescimento de resistência a compressão pode ser indicado estudos adicionais, como análise comparativa em laboratório e *in loco* com leituras em pilares e corpos de prova iguais ao longo do tempo. Por fim, através da técnica ultrassônica é possível atestar a qualidade do concreto e estimar resistência e módulo de Young, estabelecendo um diagnóstico assertivo.

REFERÊNCIAS

- 1 Hellier, CJ. Handbook of Nondestructive Evaluation. New York: McGraw-Hill, 2003.
- 2 Lorenzi A, Reginatto LA, Silva Filho LCP, Lorenzi, LS. Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto através da aplicação de ensaios não destrutivos. ABENDI: XXXIV – Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. 2016.
- 3 Haach VG, Juliani LM. Possibilities of using ultrasound for the technological control of concrete of hollow-core slabs. Construction and Building Materials. 2017; 133:409-415.
- 4 Wahab A, Aziz MMA, Mohd Sam AR, You KY, Bhatti A Q, Kassim KA. Review on microwave nondestructive testing techniques and its applications in concrete technology. 2019; 209:135-146.
- 5 Metha, PK, Monteiro, PJM. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini; 1994.
- 6 Bungey, JH, Millard, SG, Grantham, MG. Testing of concrete in structures. Contents 3: Ultrasonic pulse velocity methods. 4ª ed. Taylor & Francis; 2006.
- 7 Ashrafian A, Amiri MJT, Rezaie-Balf M, Ozbakkaloglu T, Lotfi-Omran O. Prediction of compressive strength and ultrasonic pulse velocity of fiber reinforced concrete incorporating nano silica using heuristic regression methods. Construction and Building Materials. 2018; 190: 479–494.
- 8 American Concrete Institute. ACI 228.2R-13: Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.
- 9 Cosmes-López MF, Castellanos F, Cano-Barrita PF. de J. Ultrasound frequency analysis for identification of aggregates and cement paste in concrete. Ultrasonics. 2017; 73: 88-95.
- 10 Lorenzi A, Silva Filho LCP da; Caetano LF, Somensi Lorenzi L. Monitoramento de Estruturas de Concreto através de Ensaios de Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico. IBRACON: Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. 2009.
- 11 Lorenzi A, Caetano LF, Graeff AG, Chies JA, Campagnolo JL, Silva Filho LCP da, Strieder AJ. Diagnóstico de Estruturas de Concreto através da Aplicação de Ensaios Não Destrutivos. IBRACON: Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto. 2012.

- 12 Hassan, A.M.T., S.W.Jones. Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques. *Construction and Building Materials*. 2012; 35: 361–367.
- 13 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8953:2015 - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.
- 14 Tsioulou O, Lampropoulos A, Paschalis S. Combined Non-Destructive Testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Construction and Building Materials*. 2017; 131: 66–77.
- 15 Neville, AM. *Tecnologia do concreto*. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman; 2013.