

## Determinação da resistência e rigidez de concreto após simulação de incêndio através de modelos de regressão múltiplos entre propagação de ondas e temperatura

R. R. C. Silva<sup>1\*</sup> , Y. B. Gomes<sup>2</sup> 

\* Autor de Contato: [rodrigorogerioudoutorado@gmail.com](mailto:rodrigorogerioudoutorado@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.663>

Recebido: 30/01/2023 | Correções recebidas: 23/11/2023 | Aceito: 11/12/2023 | Publicado: 01/01/2024

### RESUMO

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o comportamento dos parâmetros físicos, mecânicos e elásticos de concretos confeccionados com diferente relação água/cimento, submetidos a diferentes patamares de temperaturas, através da propagação de ondas ultrassônicas. Após exposição a elevadas temperaturas, amostras de concretos cilíndricas e prismáticas foram submetidas ao resfriamento tipo lento e brusco, demonstrando a influência do tipo de resfriamento na resistência à compressão, módulo de elasticidade, perda de massa e velocidade de propagação de ondas. Foram desenvolvidos modelos de regressão múltiplos estatisticamente significativos, ao nível de 95% de confiança, como preditores de resistência e rigidez do concreto, através das velocidades obtidas pelo ensaio de ultrassom, permitindo realizar o monitoramento e a verificação da integridade de estruturas após situações de incêndio.

**Palavras-chave:** altas temperaturas; concreto; propagação de ondas ultrassônicas; resistência e rigidez.

**Citar como:** Silva, R. R. C., Gomes, Y. B. (2023), "*Determinação da resistência e rigidez de concreto após simulação de incêndio através de modelos de regressão múltiplos entre propagação de ondas e temperatura*", Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 40 – 56, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.663>

<sup>1</sup> Laboratório de Ensaio Não Destrutivos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, Brasil.

<sup>2</sup> Laboratório de Materiais de Construção Civil, Universidade Nove de Julho, São Paulo/SP, Brasil.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, Silva, R. R. C., contribuiu com a aquisição de financiamento atividade, metodologia, investigação, preparação do programa experimental das amostras, supervisão e análise de dados, Gomes, Y. B. contribuiu com a conceituação, metodologia, redação de rascunho e original.

#### Licença Creative Commons

Copyright (2024) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2024, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2024.

## **Determination of concrete strength and stiffness after fire simulation through multiple regression models between wave propagation and temperature**

### **ABSTRACT**

The aim of this research was to evaluate the behaviour of the physical, mechanical and elastic parameters of concretes made with different water/cement ratios, subjected to different temperature levels, using ultrasonic wave propagation. After exposure to high temperatures, cylindrical and prismatic concrete samples were subjected to slow and abrupt cooling, demonstrating the influence of the type of cooling on compressive strength, modulus of elasticity, mass loss and wave propagation speed. Statistically significant multiple regression models were developed at the 95% confidence level as predictors of concrete strength and stiffness through the velocities obtained by ultrasound testing, enabling the integrity of structures to be monitored and verified after fire situations.

**Keywords:** high temperatures; concrete; ultrasonic wave propagation; strength and stiffness.

## **Determinación de la resistencia y rigidez del hormigón tras la simulación de un incendio mediante modelos de regresión múltiple entre la propagación de las ondas y la temperatura**

### **RESUMEN**

El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento de los parámetros físicos, mecánicos y elásticos de hormigones fabricados con diferentes relaciones agua/cemento, sometidos a diferentes niveles de temperatura, utilizando la propagación de ondas ultrasónicas. Después de la exposición a altas temperaturas, muestras cilíndricas y prismáticas de hormigón fueron sometidas a enfriamiento lento y brusco, demostrando la influencia del tipo de enfriamiento en la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, pérdida de masa y velocidad de propagación de ondas. Se desarrollaron modelos de regresión múltiple estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95% como predictores de la resistencia y rigidez del hormigón a través de las velocidades obtenidas por las pruebas de ultrasonidos, lo que permite controlar y verificar la integridad de las estructuras tras situaciones de incendio.

**Palabras clave:** altas temperaturas; hormigón; propagación de ondas ultrasónicas; resistencia y rigidez.

### **Informações legais**

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações da engenharia civil está relacionada em relação às alterações das propriedades de resistência e deformações dos elementos estruturais de concreto quando submetidas a situações de incêndio com elevadas temperaturas. O conhecimento estrutural pós-ação de elevadas temperaturas em concreto constitui-se um desafio no meio acadêmico, diante das velocidades de resfriamento. De acordo com Moreno e Souza (2010) o combate de um incêndio representa a ação de um resfriamento brusco, ocasionando redução de resistência devido as variações dos gradientes de temperatura que se originam no concreto. O crescente avanço tecnológico nas últimas décadas proporcionou com a contribuição de novas tecnologias para o setor da construção civil, em especial aos ensaios que utilizam ondas ultrassônicas, permitindo a avaliação de estruturas de concreto sem a necessidade de extração de corpos de prova das estruturas para analisar parâmetros mecânicos e elásticos.

As normas brasileiras ABNT-NBR 8802 (2019), europeias BS 1881:203 (1986), ACI 228 (2003) e EN 12504 (2004), propõem que correlações entre velocidade de propagação de ondas de ultrassom e resistência do concreto sejam utilizadas após calibração para um determinado traço e/ou características dos componentes, tais como a proporção dos agregados, relação água-cimento. Entretanto os resultados do ensaio de ultrassom são parâmetros de medidas indiretas e devem ser interpretados como indicativos de comportamento, mas que em situações de tomada de decisão devem ser acompanhados de ensaios destrutivos que determinem as reais propriedades que estão sendo avaliadas. Segundo Estacehen (2020) o método de avaliação da resistência à compressão do concreto, através de moldagem e rompimento de corpos de prova continua sendo o sistema de avaliação de maior confiabilidade, seguido pelos testemunhos que demonstram melhores parâmetros de segurança numa avaliação real da estrutura, se tratando de estruturas já executadas. O ensaio de ultrassom contribui para classificar e caracterizar o concreto, mas também utilizado para detectar falhas internas e a espessura do concreto (Ohdaira e Masuzawa, 2000; Sutan e Meganathan, 2003). Pesquisadores tem utilizado o ensaio de ultrassom para criação de modelos de correlação para prever as relações entre propagação de ondas de ultrassom e outras características físico-mecânicas. Entretanto, deve-se ter cuidado na utilização com curvas de correlações, pois são vários os fatores que podem interferir nos resultados como resistência (Silva, 2020), módulo de elasticidade (Trtnik et al., 2008; Yildirim e Şengul, 2011), densidade (Mohammed e Hasan, 2016), porosidade (Lafhaj et al., 2006) e permeabilidade (Panzer et al., 2008). Além disso, as propriedades da relação água-cimento (Ye et al., 2011; Silva, 2020), dimensão dos agregados (Berriman et al., 2005), processo de hidratação (Zhang, et al., 2009), e condições de cura câmara et al. (2019). Além do estado de tensões que afeta a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, sendo este fenômeno chamada de acustoelástica (Lillamand et al., 2010). A temperatura tem grande influência na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no material concreto, esse efeito parece ser insignificante para temperaturas na faixa 10 a 30 ° C, de acordo com a norma DIN EN 12504 (2004). Estudos experimentais realizados em amostras de concreto com diferentes relações água-cimento, submetidas a elevadas temperaturas variando entre 400 a 600°C (Gyu-Yong et al.; 2009); 400 a 600°C (Yang et al, 2009); 100 a 400 ° C (Ozawa et al., 2014); -18 a 180°C (Güneyli et al., 2017), 100 a 700°C (Hwang et al., 2018), verificaram diminuição da velocidade de pulso ultrassônico do concreto, bem como, resistência a compressão e módulo de elasticidade, após o resfriado em amostras submetida a temperaturas acima de 300°C. Sendo possível monitorar os defeitos internos em concreto, devido existir uma correlação entre o aumento de fissuras ocasionado pela expansão a altas temperaturas com a diminuição da propagação de onda de ultrassom.

A Eurocode 2 (2004) e a ABNT - NBR 15200 (2012) apresentam modelos que determinam a resistência característica à compressão do concreto e módulo de elasticidade, de acordo com o

acréscimo de temperatura, através de valores indicativos do fator de redução da resistência característica ( $k_c, \Theta$ ) e redução do módulo de elasticidade ( $k_{cE, \theta}$ ). Na literatura científica os estudos que avaliam os parâmetros mecânicos e elásticos do concreto, através do ensaio de ultrassom para diferentes patamares de temperatura e tipos de resfriamento (lento e brusco), utilizam o ensaio direto, considerado o mais adequado para correlacionar propriedades mecânicas do material com a velocidade de propagação das ondas. No entanto a avaliação de estruturas pós-incêndio, quase nunca tem acesso às extremidades da peça sob inspeção, sendo necessário realizar o ensaio indireto. Diante dos aspectos mencionados, o objetivo geral da pesquisa foi obter modelos de regressão múltipla entre diferentes patamares de temperatura e tipos de resfriamento, associado aos parâmetros obtidos pelo ensaio de ultrassom pelo método direto e indireto, para determinar a estimativa da resistência e rigidez do concreto, permitindo o monitoramento e a avaliação da integridade de estruturas após situações de incêndio.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Agregado miúdo e graúdo.

O agregado miúdo escolhido foi areia natural de origem quartzosa, extraída de rio. A caracterização dos agregados miúdos foi realizada segundo as recomendações das normas para agregado miúdo ABNT - NBR (NM 248, 2003; NM 52, 2009; NM 45, 2006; NM 46, 2003), estando os resultados conforme (Tabela 1). O agregado graúdo utilizado é de origem granítica, extraído do Estado de São Paulo, caracterizado por meio da ABNT-NBR (NM 248, 2003; NM 53, 2002; NM 45, 2006), específico conforme a tabela (1), classificando o agregado graúdo como brita 1.

Tabela 1. Resultados da caracterização física dos agregados miúdos e graúdos.

Agregado	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura
Areia	2650	1410	2,4	2,25
Granito	2690	1500	12,5	5,80

### 2.2 Preparação das amostras.

A metodologia utilizada para a realização do ensaio das amostras de concreto no período de 28 dias, submetidas a diferentes temperaturas, seguiram a mesma metodologia acordo com a literatura encontrada nos trabalhos de Wendt (2006), Forigo (2017) e Hwang et al. (2018), ao qual atribuem credibilidade para a metodologia proposta nos ensaios.

O traço utilizado em massa foi de (1:2,3:2,5) com consumo de cimento de 380 Kg/m<sup>3</sup>. Durante a preparação dos traços variou-se somente a relação água/cimento nas seguintes proporções (0,5; 0,6 e 0,7) para obter diferentes resistências à compressão do concreto aos 28 dias. As densidades médias dos concretos produzidos com os diferentes agregados diminuíram com o aumento do fator água-cimento, conforme o esperado (Tabela 2). Também conforme esperado ocorreu aumento no *slump* (NM 67, 1998) com o aumento do fator água-cimento (Tabela 2). Apesar das variações, os valores de todas as densidades estão dentro dos limites considerados normais para o concreto, de 2000 kg.m<sup>-3</sup> a 2800 kg.m<sup>-3</sup>, segundo norma brasileira (ABNT-NBR 9778, 2015) e literatura (Silva, et al., 2020). A amostragem para cada relação a/c foi composta por 48 corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm) confeccionados de acordo com a ABNT-NBR 5738 (2003) e 16 prismáticos (200 x 200 x 400) mm, utilizando cimento CII-F-32, comumente utilizado na construção civil. Totalizando para o programa experimental 144 corpos de prova cilíndricos e 48 prismáticos. A variação da amostragem em relação ao fator água cimento (a/c) permitirá verificar o desempenho do concreto submetidos a temperatura ambiente, e à ação de altas temperaturas (250°C, 550°C e

850°C). Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a concretagem e colocados em cura submersa, em água e cal, ao período de 28 dias. Após o período de cura, as amostras foram colocadas em temperatura ambiente, em seguida a altas temperaturas.

Tabela 2. Valores de slump e de densidade média das amostras de concreto.

Fator (a/c)	Slump (mm)	Densidade média (kg.m <sup>-3</sup> )
0,5	70	2295
0,6	110	2231
0,7	200	2145

### 2.3 Ensaios a altas temperaturas

Para cada fator água/cimento (0,5; 0,6 e 0,7), 12 corpos de prova cilíndricos e 4 prismáticos foram submetidos a temperatura de especificamente 25°C (temperatura ambiente), 250°C, 550°C e 850°C, em forno elétrico industrial do tipo mufla (Figura 1a). As amostras foram pesadas antes e após a ação das altas temperaturas para avaliação da perda de massa. Como metodologia de ensaio, foram consideradas as recomendações das normas da RILEM para o aquecimento dos concretos, especificamente, RILEM TC 129-MHT (2004) e RILEM TC 200-HTC (2007), que recomenda uma taxa de aquecimento de até 4°C/min. O tempo para o alcance de cada temperatura estudada (250°C, 550°C e 850°C), foi cerca de (45 min.; 1:30 min. e 2:15 min.). Após atingir a temperatura desejada, as amostras foram mantidas em forno, por mais 60 min. para que a temperatura fosse homogênea no interior da peça. O resfriamento dos corpos de prova após o processo de homogeneização de temperatura foi realizado de duas maneiras em dois lotes. Para o lote 1, metade das amostras cilíndricas e prismáticas foi submetida a resfriamento lento, expostas a temperatura ambiente por cerca de 3 a 4 horas, em seguida aplicou-se 200 ml de água com auxílio de pulverizador sobre as amostras (Figura 1b). Após exposição a uma determinada temperatura constante, a outra metade das amostras considerada lote 2, foi resfriada de forma brusca, sendo colocadas em recipiente com água em temperatura ambiente por 60 minutos, onde posteriormente eram retiradas e expostas em temperatura e umidade ambiente (Figura 1c).

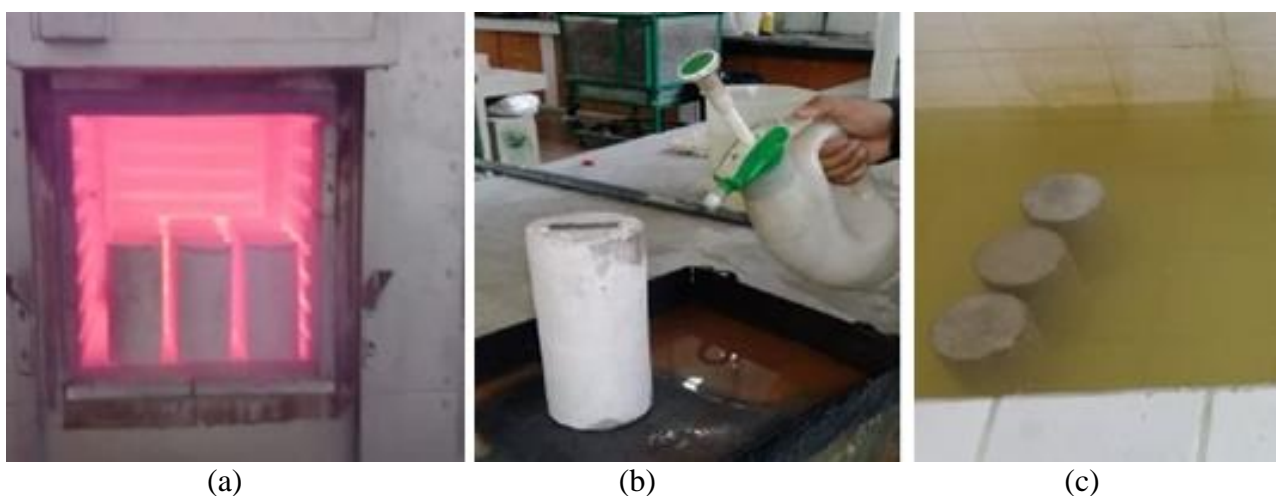


Figura 1. (a) amostras de concreto em Forno mufla, (b) resfriamento tipo lento com pulverizado, (c) resfriamento tipo brusco em recipiente com água. Autores (2023).

## 2.4 Ensaios não destrutivos por ultrassom.

Após o resfriamento lento e brusco, as amostras cilíndricas e prismáticas foram submetidas ao ensaio de propagação de ondas, utilizando equipamento de ultrassom (*Modelo Pundit*), com o auxílio de transdutores longitudinais de faces planas e frequência de 54 KHz. Antes da realização dos ensaios, o equipamento foi calibrado utilizando-se um material acrílico cuja velocidade é conhecida. As amostras cilíndricas foram ensaiadas pelo método direto (Figura 2), onde a partir dos ensaios de ultrassom foi possível obter os tempos de propagação das ondas ( $t$ ) e, assim, calcular, para cada distância entre transdutores ( $L$ ), a velocidade de propagação das ondas de ultrassom ( $V$ ), através da equação proposta por ABNT-NBR 8802 (2013), conforme equação (1).

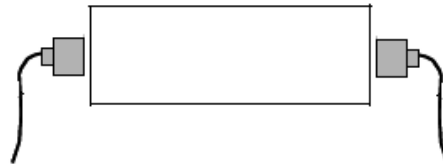


Figura 2. Ensaio direto realizado em corpo de prova cilindros de concreto.

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

Onde:  $V$  = Velocidade de propagação de ondas ( $m.s^{-1}$ );  $L$  = comprimento do corpo de prova (m),  $T$  = tempo (s).

Para as amostras prismáticas foi utilizado o método indireto de propagação de ondas (Figura 3a), utilizando como metodologia o cálculo proposto pela norma ABNT-NBR 8802 (2019), conforme equação (2). A norma brasileira propõe uma forma de cálculo da velocidade de propagação ultrassônica pelo modo de transmissão indireta, cujo procedimento consiste em calcular a velocidade por meio de um gráfico de tempo de propagação versus distância entre transdutores (Figura 3b). Sendo que as velocidades indiretas foram obtidas através das médias em três linhas de medição (região superior, média e inferior da amostra prismática).

$$V = \text{tg } \theta \quad (2)$$

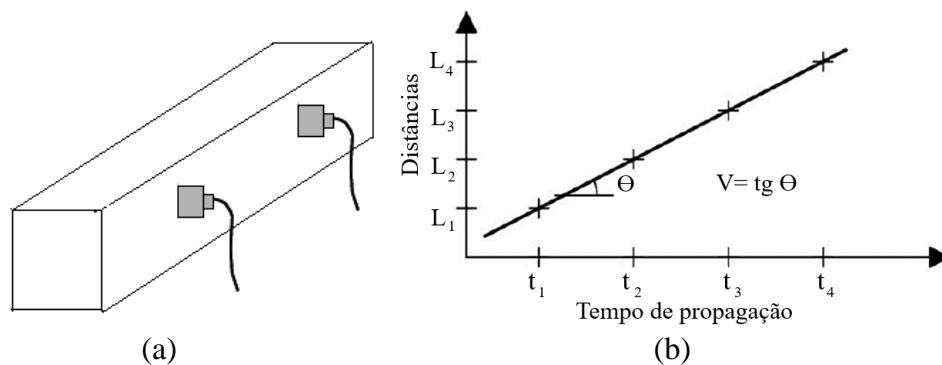


Figura 3. (a) Ensaio indireto realizado em amostras prismáticas. (b) Determinação da velocidade de propagação pelo através do método indireto. Fonte: ABNT-NBR 8802 (2019).

## 2.5 Ensaios destrutivos.

Após o ensaio de ultrassom as amostras cilíndricas foram submetidas à ensaio de resistência à compressão ( $f_c$ ) realizada em máquina hidráulica, calculado de acordo com a norma (ABNT-NBR 5739, 2018) conforme equação (3). Os corpos de prova foram instrumentados com extensômetros de resolução de 0,01 mm, para a determinação do módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) calculado de acordo

com a norma brasileira (ABNT-NBR 8522, 2017) de acordo com a equação (4).

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad (3)$$

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b^{-0,5}}{\epsilon_b - \epsilon_a} \quad (4)$$

Onde:  $f_c$  = Resistência à compressão do corpo de prova (MPa);  $F$  = força máxima alcançada (N);  $D$  = diâmetro do corpo de prova (mm);  $L$  = comprimento do corpo de prova (mm);  $E_{ci}$  = módulo de elasticidade;  $\sigma_b$  = tensão (MPa) obtida com 30% da resistência a compressão; 0,5 = valor da tensão de referência inicial (MPa);  $\epsilon_b$  e  $\epsilon_a$  = deformações específicas do concreto correspondente a tensão de 30% da resistência a compressão e sob a tensão de referência inicial.

## 2.6 Ensaio físicos.

Após as amostras cilíndricas e prismáticas, serem submetidas aos diferentes patamares de temperatura e tipo de resfriamento (lento e brusco), foi verificado a perda de massa ( $P_m$ ) para cada tipo de amostra conforme equação (5), através da pesagem realizada em balança de precisão com resolução de 0,1 g.

$$P_m = \frac{m - m_{temp}}{m} \quad (5)$$

Onde:  $P_m$  = Perda de massa (%);  $m$  = massa da amostra em temperatura ambiente (kg); (%);  $m_{temp}$  = massa da amostra submetida a determinada temperatura (kg).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através de software estatístico, foi possível analisar a distribuição de frequência dos parâmetros obtidos pelo ensaio de ultrassom (velocidade direta e indireta de propagação) e através do ensaio de compressão simples com medições de deformação (resistência e módulo de elasticidade). A análise estatística teve como objetivo analisar se existe normalidade dos parâmetros obtidos nos ensaios destrutivos e não destrutivos para as diferentes relações a/c, permitindo sua utilização para aplicação de correlações estatísticas. A normalidade foi avaliada pelos limites de assimetria e de curtose, entre -2 e + 2. Os resultados obtidos nos ensaios à compressão, módulo de elasticidade, velocidade de propagação de ondas obtidas pelos métodos diretos e indiretos nas amostras, foram avaliados estatisticamente pela análise de variância (ANOVA). As análises estatísticas foram realizadas por meio de comparação de médias a fim de verificar a existência de diferença entre os valores dos parâmetros obtidos, considerando com ênfase as variáveis do aumento de temperatura, classe de resistência e forma de resfriamento, considerando um nível de confiança de 95%. Em seguida, correlacionaram-se os valores de velocidade direta ( $V_D$ ) e velocidade indireta ( $V_I$ ), para os diferentes patamares de temperatura ( $T$ ), com os parâmetros obtidos pelo método destrutivo de compressão ( $f_c$ ) e ( $E_{ci}$ ).

### 3.1 Efeito da temperatura na resistência, rigidez e propagação de ondas de ultrassom.

A variação das propriedades do concreto exposto a temperaturas elevadas depende de muitos fatores, como materiais constituintes, resistência inicial, idade, fator água-cimento e tipo de resfriamento, esses fatores dificulta o desenvolvimento de um modelo preciso na previsão de parâmetros mecânicos e elásticos. Entretanto, quando o concreto exposto ao aumento da temperatura em 550°C e 850°C, há uma redução significativa da resistência à compressão

independente da variação do fator água-cimento e tipo resfriamento. O módulo de elasticidade apresenta a mesma tendência de redução de valores encontrados na resistência a compressão, porém independentemente do tipo de resfriamento e fator água-cimento, o decréscimo da rigidez é menos abrupto do que a resistência, principalmente em relação à temperatura em 550°C e 850°C. Os resultados encontrados demonstram que as perdas de resistência à compressão do concreto ocorrem de maneira gradual, porém, há uma tendência geral na diminuição da resistência em relação a temperatura ambiente, (50%) para a temperatura de 550°C, e para amostras submetidas a temperatura de 850°C (88 a 91%). O resfriamento tipo lento obteve melhor contribuição nos parâmetros de resistência ( $f_c$ ), apresentando valores superiores na ordem de 10 a 15%, para as temperaturas de 250°C e 550°C, e 23% para temperatura de 850°C, em relação ao resfriamento brusco. Em relação à rigidez ( $E_{ci}$ ) as amostras resfriadas lentamente houve um aumento em cerca 12% para todas as temperaturas considerando o resfriamento brusco.

Estudos realizados por Moreno e Souza (2010) também avaliaram o tipo de resfriamento em corpos de prova de concreto, os resultados também apontaram maior perda de resistência ( $f_c$ ) e rigidez ( $E_{ci}$ ) para amostras de concreto resfriado bruscamente. Segundo Yuzer et al. (2004) a diminuição dos parâmetros mecânicos e elásticos após o resfriamento brusco, está relacionada ao aumento do volume devido a reidratação do óxido de cálcio (Cao), gerando fissuras, aumento de porosidade e desagregação do concreto.

A redução da resistência a compressão, módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ondas, encontrados nas figuras (4 a 7) é atribuído aos danos causados por lascas durante o aquecimento. De acordo com Kirchhof et al. (2015) esse comportamento é devido ao rápido aumento de temperatura causando mudanças significativas na porosidade e permeabilidade do concreto devido à liberação de água, desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e, provavelmente, formação de macro e microfissuras.

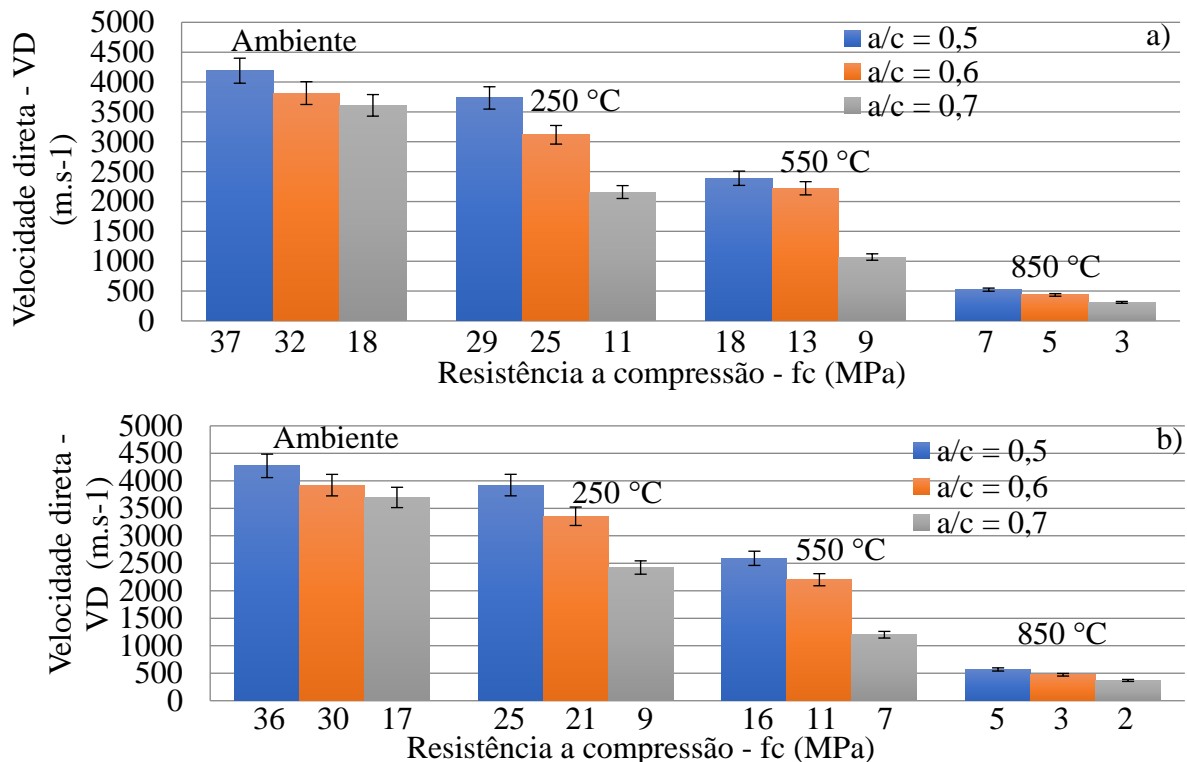


Figura 4. Valores médios (a) resfriamento lento, (b) resfriamento brusco. Para amostras ensaiadas a resistência a compressão e velocidade direta em amostras cilíndricas, após diferentes patamares de temperatura. Autores (2023).



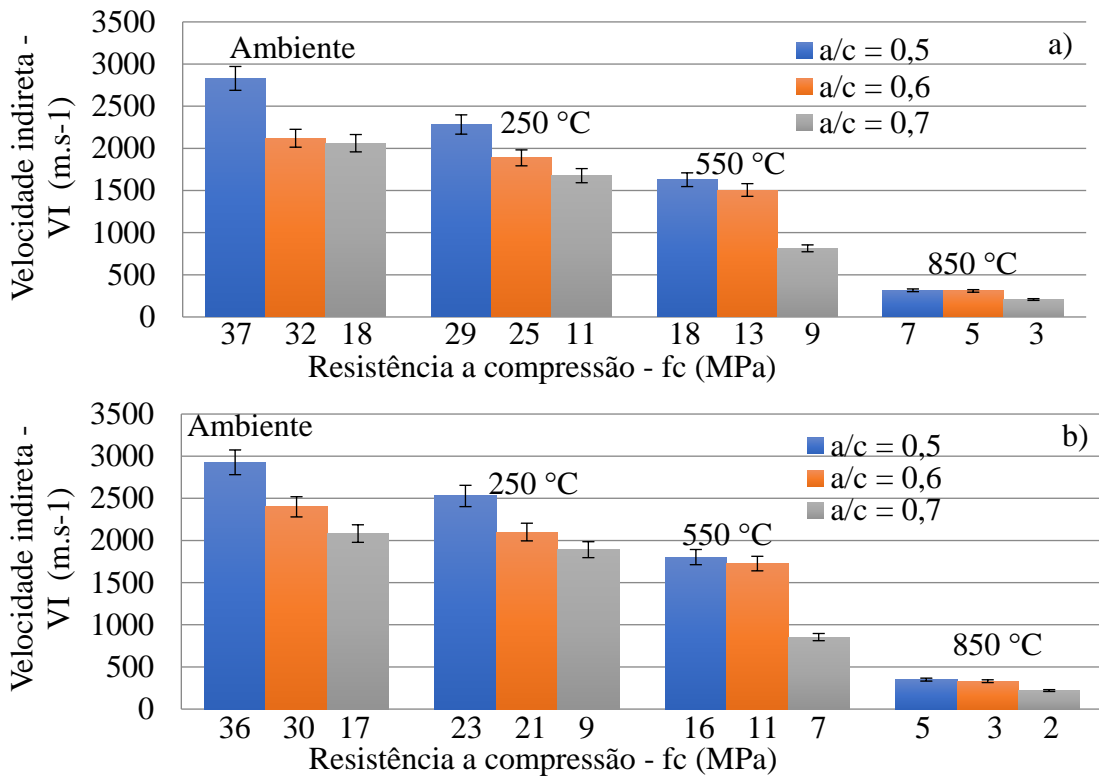


Figura 5. Valores médios (a) resfriamento lento, (b) resfriamento brusco. Para amostras cilíndricas ensaiadas a resistência a compressão e velocidade indireta em amostras prismáticas, após diferentes patamares de temperatura. Autores (2023).

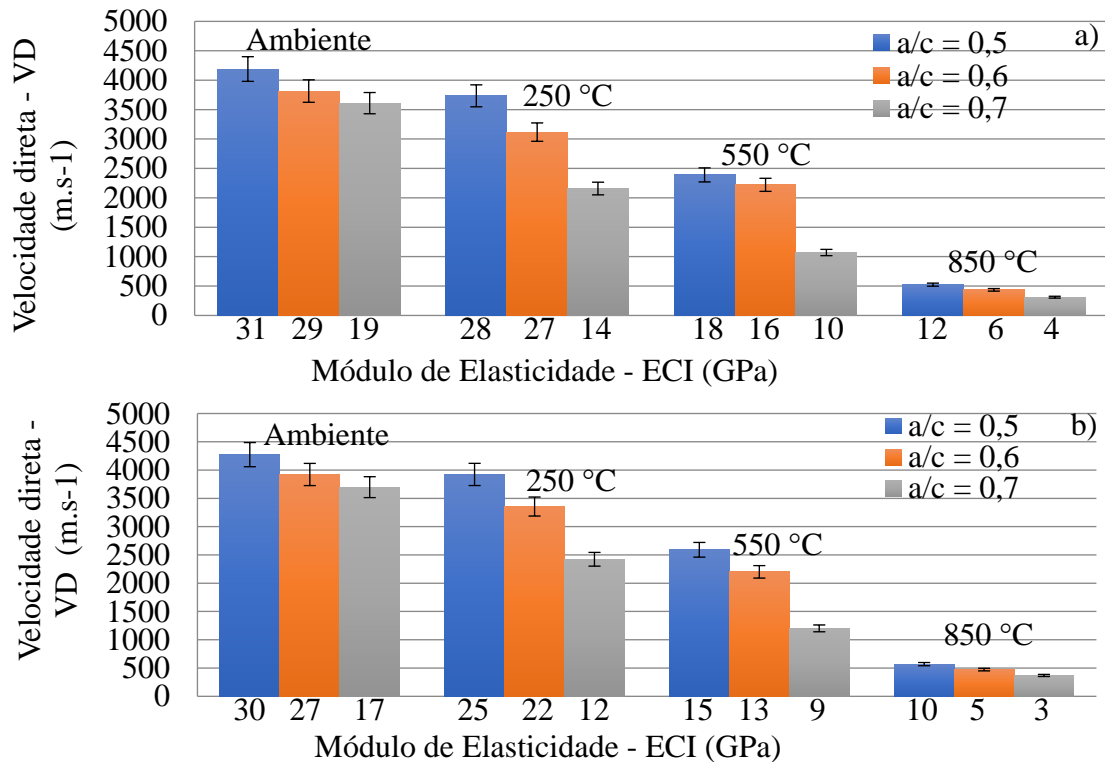


Figura 6. Valores médios (a) resfriamento lento, (b) resfriamento brusco. Para amostras cilíndricas ensaiadas por módulo de elasticidade e velocidade direta em amostras cilíndricas, após diferentes patamares de temperatura. Autores (2023).

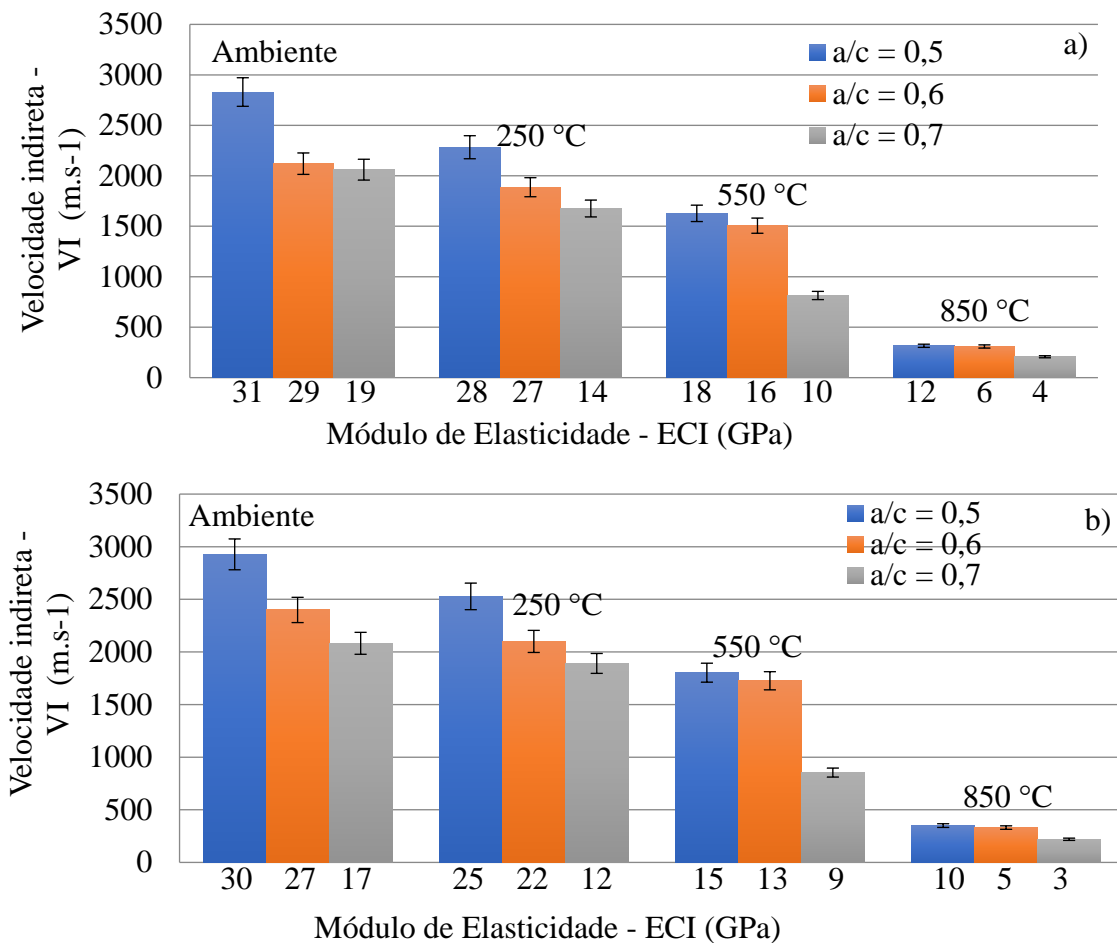


Figura 7. Valores médios (a) resfriamento lento, (b) resfriamento brusco. Para amostras cilíndricas ensaiadas por módulo de elasticidade e velocidade indireta em amostras prismáticas, após diferentes patamares de temperatura. Autores (2023).

O aumento da porosidade ocasionado pela desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), pode ser representado pelos resultados da perda de massa e velocidade direta e indireta de propagação de ondas (Figura 8 e 9), uma vez que quaisquer imperfeições no concreto, como rachaduras ou vazios contribui no aumento do tempo de propagação das ondas através do comprimento do corpo de prova, resultando em velocidades de pulso ultrassônicas mais baixas. A perda de massa ocorre de forma significativa nas amostras com fator água-cimento (0,5 e 0,6) para as temperaturas de 550°C e 850°C, e a partir de 250 °C fator água-cimento (0,7). Segundo Kirchof et al. (2015) e Viana (2017) para temperaturas acima de 400 °C, o aumento da água livre nos poros do concreto acarreta o fenômeno de *spalling* explosivo, e maior perda de massa.

As velocidades diretas e indiretas para as amostras com fatores água-cimento (0,5 e 0,6), não obtiveram elevadas reduções para temperatura de 250°C ambiente, em relação a ambiente, com variação (8 a 12%) para resfriamento lento, e (13 a 19%) para resfriamento brusco. A partir da temperatura de 550°C e 850°C é possível perceber uma acentuada redução de velocidade de propagação das ondas, para ambos os tipos de resfriamento. Entretanto as variações de velocidade direta e indireta foram elevadas, a partir de 250°C, para o fator água-cimento (0,7), devido a maior evaporação de água no interior do concreto resultando em maior perda de massa, independentemente do tipo de resfriamento. Os valores encontrados entre as velocidades indiretas foram (30 a 37%), para os diferentes fatores água-cimento e patamares de temperatura.

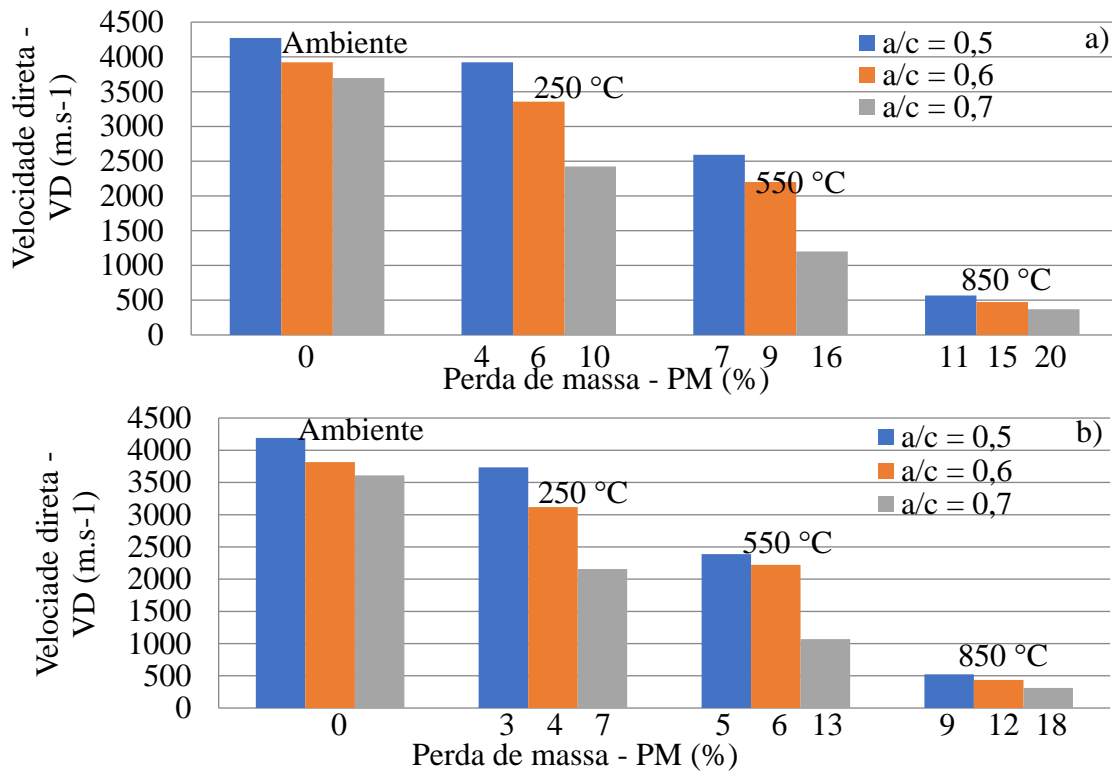


Figura 8. Valores médios (a) resfriamento lento, (b) resfriamento brusco. Para amostras ensaiadas por velocidade direta e perda de massa em amostras cilíndricas, após diferentes patamares de temperatura. Autores (2023).

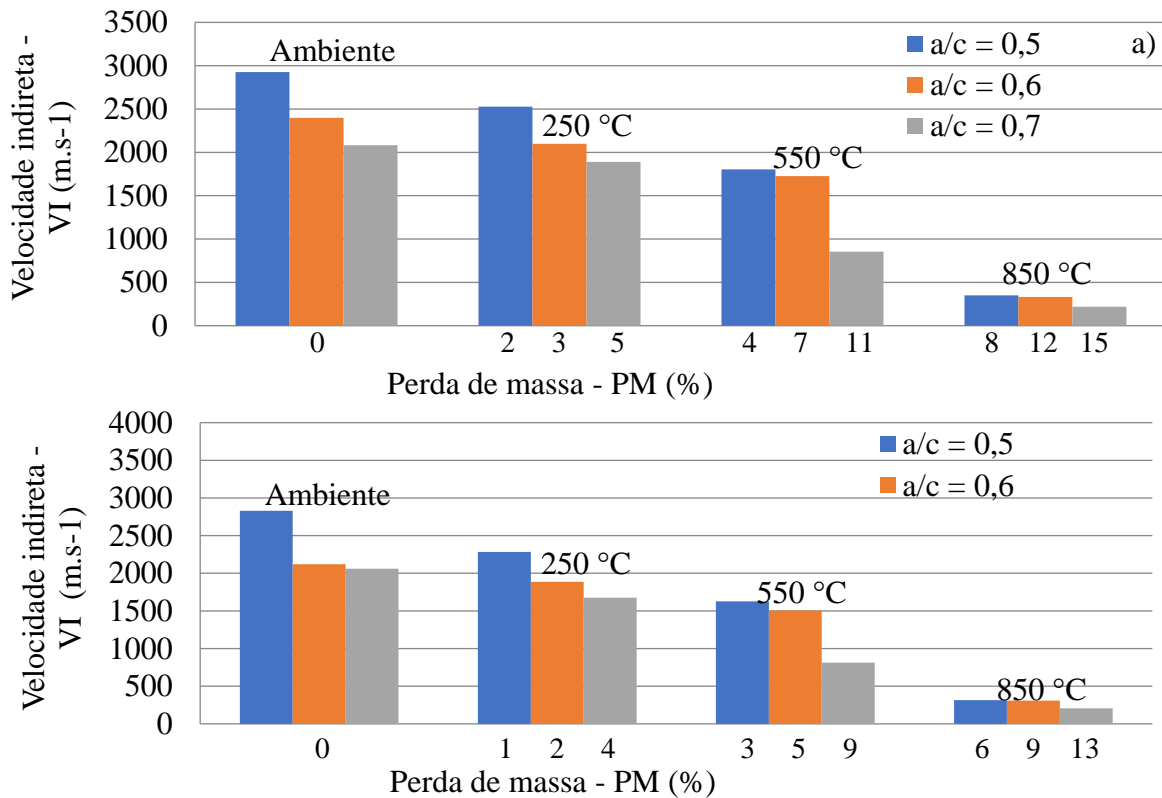


Figura 9. Valores médios (a) resfriamento lento, (b) resfriamento brusco. Para amostras ensaiadas por velocidade indireta e perda de massa em amostras prismáticas, após diferentes patamares de temperatura. Fonte: Autores (2023).

De acordo com Silva (2020) as velocidades ultrassônicas, obtidas a partir de medições indiretas, são menores do que a velocidade obtida com medições diretas, devido a medição ser realizada próxima a superfície do concreto, o qual geralmente apresenta composição diferente do concreto interno.

Embora o resfriamento lento tenha contribuído com a resistência ( $f_c$ ) e rigidez ( $E_{ci}$ ), isto não correu na velocidade de propagação de onda em ambos os métodos (direto e indireto). Apesar da baixa taxa de variação, as velocidades foram superiores na faixa de 5 a 16% para os diferentes patamares de temperatura, em amostras de concreto submetidas ao resfriamento brusco. Segundo Zhang, et al. (2009) um dos maiores fatores que afeta a velocidade ultrassônicas é a presença de umidade, assim as amostras de concreto resfriadas bruscamente absorvem mais água, reduzindo a porosidade ocasionada durante a evaporação da água, contribuindo no aumento da propagação de ondas.

### 3.2 Análises estatísticas dos ensaios não destrutivos e destrutivos.

Os parâmetros obtidos nos ensaios não destrutivos de ultrassom velocidade direta ( $V_D$ ) e velocidade indireta ( $V_I$ ), e nos ensaios destrutivos de compressão estática como a resistência a compressão ( $f_c$ ) e módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ), para concretos produzidos com diferentes fatores água-cimento e temperaturas, apresentaram distribuição de frequência compatível com a normal, verificado pela assimetria e curtose dentro do intervalo -2,0 e +2,0 conforme demonstrado na tabela (3).

Tabela 3. Valores mínimos, máximos e médios, assimetria e curtose para a velocidade direta ( $V_D$ ) e indireta ( $V_I$ ) de propagação das ondas de ultrassom, resistência ( $f_c$ ) e o módulo de elasticidade inicial ( $E_{ci}$ ) obtidos em ensaio de compressão, para os traços produzidos com diferentes relações água cimento e patamares de temperatura.

Relação a/c	Parâmetro	Mínimo	Máximo	Médio	Assimetria e Curtose
0,5	$f_c$ (MPa)	4,4	35,8	20	-0,20 e -0,81
	$E_{ci}$ (GPa)	10,8	30,6	21	-0,11 e -1,2
	$V_D$ (m.s <sup>-1</sup> )	524	4273	2399	-0,54 e -0,93
	$V_I$ (m.s <sup>-1</sup> )	316	2927	1622	-0,77 e 0,20
0,6	$f_c$ (MPa)	2,8	31,5	17	-0,04 e -0,92
	$E_{ci}$ (GPa)	4,7	29,2	17	-0,38 e -0,91
	$V_D$ (m.s <sup>-1</sup> )	436	3815	2126	-0,82 e -0,56
	$V_I$ (m.s <sup>-1</sup> )	309	2566	1438	-0,74 e -0,47
0,7	$f_c$ (MPa)	1,9	17,6	10	0,34 e - 0,52
	$E_{ci}$ (GPa)	3,6	18,5	11	-0,01 e -0,75
	$V_D$ (m.s-1)	311	3798	2055	0,01 e -0,23
	$V_I$ (m.s-1)	207	2282	1245	-0,27 e -0,98

As velocidades obtidas apresentam valores compatíveis com resultados de pesquisas científicas que submeteram concretos aos mesmos patamares de temperatura como (Yang et al, 2009; Ozawa et al., 2014, Güneşli et al., 2017; Hwang et al., 2018), demonstrando que a metodologia aplicada (patamares de temperatura-ensaio de ultrassom-ensaio destrutivo) foi adequadamente aplicada. Alguns autores (Wendt, 2006; Forigo, 2017; Hwang et al., 2018), propõem o uso da velocidade de propagação de ondas de ultrassom, obtidas no ensaio direto, na inferência da qualidade, da resistência e da rigidez do concreto submetidos a diferentes patamares de temperatura. No entanto, esses mesmos autores não consideram que as estruturas pós-incêndio, nem sempre tem acesso às extremidades da peça, sendo o método indireto o ideal na avaliação estruturas. Sendo assim uma contribuição científica da presente pesquisa, a criação de modelos para a determinação da resistência e rigidez, com velocidade de ultrassom obtida pelo método direto e indireto associada ao conhecimento da temperatura na estrutura.

Turgut e Kucuk (2006) e Savaliya et al. (2014), concluíram que o método indireto é o mais preciso para a detecção de patologias, demonstrando que o ensaio direto tem mais sensibilidade para detectar os defeitos, mas não viabiliza sua localização, enquanto o ensaio indireto permite melhor localização do defeito após ter sido detectado. Através da análise de distribuição de frequência (tabela 4), foi possível obter modelos de regressão múltiplos entre velocidade de propagação de ondas e temperatura (Tabelas 4 e 5), contribuindo na literatura com os modelos propostos pela Eurocode 2 (2004) e ABNT - NBR 15200 (2012), na inferência da resistência ( $f_c$ ) e rigidez ( $E_{ci}$ ) de concretos submetido a elevadas temperaturas e tipos de resfriamento.

Tabela 4. Correlação entre os ensaios destrutivos combinados com velocidade de propagação de ondas e temperatura, para resfriamento lento.

Fator a/c	Parâmetro	Modelo	P-Valor	R <sup>2</sup> (%)	Erro de estimativa
0,5	$f_c$	$f_c = 54,20 - 0,0038.V_D - 0,055.T$	0,000	99,66	0,70
		$f_c = 30,24 + 0,0022.V_I - 0,030.T$	0,000	99,64	0,72
	$E_{ci}$	$E_{ci} = 14,40 + 0,0037.V_D - 0,0062.T$	0,000	96,59	1,49
		$E_{ci} = 16,05 + 0,0050.V_I - 0,0077.T$	0,000	95,79	1,66
0,6	$f_c$	$f_c = 35,98 - 0,00080.V_D - 0,037.T$	0,000	99,56	0,75
		$f_c = 35,57 - 0,0011.V_I - 0,037.T$	0,000	99,58	0,74
	$E_{ci}$	$E_{ci} = 22,03 + 0,0023.V_D - 0,020.T$	0,000	97,39	1,60
		$E_{ci} = 25,04 + 0,0025.V_I - 0,023.T$	0,000	98,67	1,23
0,7	$f_c$	$f_c = 7,41 + 0,0027.V_D - 0,0060.T$	0,000	95,52	1,22
		$f_c = 33,52 - 0,0071.V_I - 0,034.T$	0,000	98,15	0,78
	$E_{ci}$	$E_{ci} = 19,13 - 0,000096.V_D - 0,017.T$	0,000	96,87	1,02
		$E_{ci} = 20,74 - 0,00086.V_I - 0,019.T$	0,000	96,92	1,01

Tabela 5. Correlação entre os ensaios destrutivos combinados com velocidade de propagação de ondas e temperatura, para resfriamento brusco.

Fator a/c	Parâmetro	Modelo	P-Valor	R <sup>2</sup> (%)	Erro de estimativa
0,5	$f_c$	$f_c = 51,45 - 0,0032.V_D - 0,052.T$	0,000	99,13	1,10
		$f_c = 61,51 - 0,0084.V_I - 0,063.T$	0,000	99,05	1,22
	$E_{ci}$	$f_c = 24,42 + 0,0013.V_D - 0,0182.T$	0,000	97,48	1,29
		$f_c = 12,31 + 0,0060.V_I - 0,0053.T$	0,000	97,72	1,23
0,6	$f_c$	$f_c = 36,61 - 0,0015.V_D - 0,038.T$	0,000	98,90	1,14
		$f_c = 34,72 - 0,0018.V_I - 0,036.T$	0,000	98,93	1,15
	$E_{ci}$	$E_{ci} = 33,74 - 0,00067.V_D - 0,033.T$	0,000	99,26	0,89
		$E_{ci} = 33,0939 - 0,00087.V_I - 0,033.T$	0,000	99,27	0,88
0,7	$f_c$	$f_c = -7,56 + 0,0077.V_D + 0,0087.T$	0,000	90,50	2,01
		$f_c = 61,87 - 0,020.V_I - 0,066.T$	0,000	95,21	1,42
	$E_{ci}$	$E_{ci} = 18,88 - 0,00090.V_D - 0,017.T$	0,000	97,09	0,83
		$E_{ci} = 18,82 - 0,0012.V_I - 0,017.T$	0,000	97,07	0,84

Todos os modelos de regressão foram estatisticamente significativos para nível de significância de 95% (P-valor < 0,05) – Tabelas (6) e (7), com coeficientes de correlação superiores em 95% para

Determinação da resistência e rigidez de concreto após simulação de incêndio através de modelos de regressão múltiplos entre propagação de ondas e temperatura

resfriamento lento e 90% para tipo brusco, indicando que ambos modelos podem ser utilizados para inferir a resistência e a rigidez do concreto, para diferentes temperaturas quando apresentarem pico máximo de 850°C.

Os valores dos coeficientes de correlação ( $R^2$ ) obtidos se enquadram dentro das faixas de variação das grandezas envolvidas dos modelos propostos por pesquisadores como Wendt (2006), Forigo, (2017) e Hwang et al. (2018), utilizando características e metodologia semelhante das amostras em estudo como dimensão dos agregados graúdos, corpos de prova cilíndrico e variações da relação a/c. Embora as expressões não sejam iguais não há discrepâncias de comportamento baseado nos valores de  $R^2$  encontrados nos modelos de regressão múltiplos, em relação aos modelos de regressão simples encontrados na literatura. Podendo assim os modelos de regressão múltiplos utilizados para a inferência de ( $f_c$ ) e ( $E_{ci}$ ), com as grandezas medidas nos ensaios de propagação de ondas ultrassônica ( $V_D$  e  $V_I$ ) para diferentes patamares e temperatura (T), para concretos com resistência a compressão entre 2 a 35 MPa.

#### 4. CONCLUSÕES

Através dos ensaios realizados para analisar a relação entre propagação de ondas com resistência a compressão do concreto e módulo de elasticidade para concretos confeccionados com diferentes relações água/cimento (0,5; 0,6 e 0,7) submetidos a diferentes patamares de temperaturas (ambiente, 250°C, 550°C e 850°C) foi possível concluir que:

Para amostras com fator água-cimento (0,7) as mudanças nos parâmetros físicos ( $P_m$ ), mecânicos ( $f_c$ ), rigidez ( $E_{ci}$ ) e acústico ( $V_D$  e  $V_I$ ), ocorrem para as temperaturas acima de 250°C, e para o fator água-cimento (0,5 e 0,6) acima de 550°C.

A perda de massa das amostras cilíndricas e prismáticas é maior para as amostras submetidas a temperatura de 850°C, devido a total evaporação da água intersticial do concreto, e maiores lascamentos por *spalling*.

O resfriamento lento possui maior influência nos parâmetros mecânicos ( $f_c$ ), rigidez ( $E_{ci}$ ), sendo que o resfriamento brusco contribui para o aumento dos parâmetros acústicos ( $V_D$  e  $V_I$ ), devido à absorção de água das amostras de concreto para as temperaturas de (250°C, 550°C e 850°C), diminuindo os vazios e contribuindo com a propagação de ondas.

Através da velocidade de propagação de ondas obtidas pelos métodos diretos e indiretos, é possível detectar a presença de patologias para concreto expostos a temperatura acima de 250°C.

Os modelos de regressão múltiplos, sem distinção da relação água-cimento, foram estatisticamente significativos (P-valor < 0,05) com 95% de nível de confiança, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 90%, permitindo a predição da resistência ( $f_c$ ) e rigidez ( $E_{ci}$ ), através da velocidade de propagação de ondas direta e indireta associada a temperatura, para realizar o monitoramento e a avaliação da integridade de estruturas após situações de incêndio.

O ensaio de ultrassom, é uma ferramenta de avaliação preliminar para detecção de patologias das estruturas, bem como sua resistência estrutural, ao qual deverá seguir de ensaios complementares por métodos destrutivos para validação dos seu diagnóstico.

Os resultados apresentados são indicativos de comportamento do material concreto em escala de laboratório, mas que não podem ser extrapolados de maneira simples e direta para o comportamento das estruturas reais de concreto armado em situação de incêndio, as quais podem apresentar comportamento completamente distinto dos obtidos em laboratório durante um incêndio.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) de São Paulo pelo apoio ao grupo de pesquisa, que viabilizou as instalações e infraestrutura utilizadas nesta pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute (2013). ACI 228. 2R. *Report On Nondestructive Test Methods For Evaluation Of Concrete In Structures*, Detroit.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). *NBR 11578: Cimento Portland Composto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *Agregados: Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro. 2006.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR NM 53. *Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR NM 52. *Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco Chapman*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1998). *NBR NM 67. Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). NBR 9778. *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR 7211. *Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 5738. *Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018) NBR 5739. *Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 8522. *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). NBR 8802. *Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 15200: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio*. Rio de Janeiro.
- Berriman, J., Purnell, P., Hutchins, D.A., Neild, A. (2005). *Humidity and aggregate content correction factors for air-coupled ultrasonic evaluation of concrete*, *Ultrason.*, Vol. 43, No. 4, Pp. 211–217.
- British standards institution (1998). BS 1881 - PART 203: *Recommendations for measurement of velocity pulses in concrete*. London: p.20.
- Camara, L.A., Wons, M., Esteves, I.C., Medeiros-Junior, R. A. (2019). *Monitoring the self-healing of concrete from the ultrasonic pulse velocity*. *Journal Of Composites Science*, V. 3, N. 1, P. 16. <https://doi.org/10.3390/jcs3010016>.
- Din En 12504-4: (2004). *Testing concrete in structures. Part 4: Determination Of Ultrasonic Pulse Velocity*, German.
- Estacechen, T. A. C. (2020). *Comparativo da resistência à compressão do concreto através de ensaios destrutivos e não destrutivos*. *CONSTRUINDO*, v. 12, n. 2, p. 23-37.
- European committee for standardization. (2004). En 1992-1-2: *Eurocode 2: Design Of Concrete Structures – Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design*.
- European committee for standardization (2004). BS EN 12504:4, *Testing Concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity*, Brussels.
- Forigo, C. (2017). *Determinação da resistência à compressão em concretos expostos a altas temperaturas por meio de ensaios não destrutivos*. Dissertação de mestrado. Universidade estadual de maringá. P. 215.
- Güneyli, H., Karahan, S., Güneyli, A. (2017). *Water content and temperature effect on ultrasonic pulse velocity of concrete*. *Russian journal of nondestructive testing*, v. 53, n. 2, p. 159-166. <https://doi.org/10.1134/S1061830917020024>.

- Gyu-yong, K. I. M., Young-Sun, K. I. M., Tae-Gyu, L. E. E. (2009). *Mechanical properties of high-strength concrete subjected to high temperature by stressed test*. Transactions of nonferrous metals society of china, v. 19, p. S128-s133. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60260-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60260-9).
- Hwang, E., Kim, G., Choe, G., Yoon, M., Gucunski, N., Nam, J. (2018). *Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity*. Construction and building materials, v. 171, p. 511-520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.178>.
- Kirchhof, L. D., Lorenzi, A., Silva F., Luiz C. P. (2015). *Assessment of concrete residual strength at high temperatures using ultrasonic pulse velocity*. The e-journal of nondestructive testing, v. 20, n. 7, p. 1-9.
- Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A., Kaczmarek, M. (2006). *Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content*, Cem. Concr. Res., vol. 36, no. 4, pp. 625–633. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.009>.
- Lillamand, I., Chaix, J. F., Ploix, M. A., Garnier, V (2010). *Acoustoelastic effect in concrete material under uni-axial compressive loading*. NDT & E International, v. 43, n. 8, p. 655-660. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.07.001>.
- Moreno Jr, A. L., Souza, A. A. A. (2010). *Efeito de altas temperaturas na resistência a compressão, resistência a tração e modulo de deformação do concreto*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, vol. 3, n. 4, p. 432-448.
- Ohdaira, E. And Masuzawa, N. (2000). *Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete—the possibility of nde, ultrason.*, vol. 38, nos 1-8, pp. 546–552. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00158-4).
- Ozawa, M, Morimoto, Hi. (2014). *Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete*. Construction and building materials, v. 71, p. 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.068>.
- Panzer, T.H., Rubio, J.C., Bowen, C.R., Vasconcelos, W.L., Strecker, K. *Correlation between structure and pulse velocity of cementitious composites*, adv. Cem. Res, vol. 20, no. 3, pp. 101–108. <https://doi.org/10.1680/adcr.2008.20.3.101>.
- Rilem TC 129-MHT: (2000). *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures*. Part1-9.
- Rilem TC 200-HTC: (2007). *Mechanical concrete properties at high temperatures - modelling and application*.
- Savaliya, K. D., Thaker, K. K., Dave, U. V. (2014). *Comparison between different methods of ultrasonic pulse velocity tests on concrete*. International journal of engineering research and applications (ijera), (march), 41–44.
- Silva, R. R. C., Gonçalves, R., Bertoldo, C. P. (2020). *Classification and inspection of reinforced concrete elements for use in retaining walls using ultrasound tests*. Construction and Building Materials, v. 262, p. 120010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120010>.
- Sutan, N., M., Meganathan, M. A. (2003). *Comparasion Between Direct And Indirect Method Of Ultrasonic Pulse Velocity In Detecting Concrete Defects*. Journal ntd, vol. 8 no.05, may.
- Trtnik, G., Turk, G., Kavcic, F., Bosiljkov, V.B. (2008). *Possibilities of using the ultrasonic wave transmission method to estimate initial setting time of cement paste*, Cement and Concrete. Res., vol. 38, no. 11, pp. 1336–1342. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.08.003>.
- Turgut, P., Kucuk, O. F. (2006). *Comparative Relationships Of Direct, Indirect, And Semi-Direct Ultrasonic Pulse Velocity Measurements In Concrete*. Russian journal of nondestructive testing, 2006, vol. 42, no. 11, pp. 745–751. <https://doi.org/10.1134/S1061830906110064>.
- Viana, A. Cl. (2017). *Comportamento de ondas ultrassônicas em concreto aquecido até 400 °c*. Dissertação de mestrado, Ufsc-Universidade Federal De Santa Catarina, p.132.
- Wendt, S. C. (2006). *Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, p.188.



- Yang, H., Lin, Y., Hsiao, C., Liu, J. Y (2009). *Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity*. Fire safety journal, 44(1), 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.05.003>.
- Ye, G., Van Breugel, K., And Fraaij, A. L. A. (2011). *Experimental study on ultrasonic pulse velocity evaluation of the microstructure of cementitious material at early age*, Heron, vol. 46, no. 3, pp. 161–167.
- Yildirim, H., Sengul, O. (2011). *Modulus of elasticity of substandard and normal concretes*. Construction And Building Materials, v. 25, n. 4, p. 1645-1652. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.009>.
- Yüzer, N.; Aköz, F.; Öztürk, L. D. (2004). *Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature*. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 10, p. 1803-1807. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.015>.
- Zhang, J., Qin, L., And Li, Z.J. *Hydration monitoring of cement-based materials with resistivity and ultrasonic methods*, Material and Structures. Vol. 42, no. 1, p.15-24. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9363-0>.