

# DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS PELO MÉTODO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

C. FORIGO<sup>1</sup>, Y. D. LOPES<sup>2</sup>, L. VANALLI<sup>3</sup>

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV) - Universidade Estadual de Maringá (UEM)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8586-8524><sup>1</sup>

[lvallli@uem.br](mailto:lvallli@uem.br)<sup>3</sup>

Submetido 12/04/2020 - Aceito 07/01/2021

DOI: 10.15628/holos.2021.9904

## RESUMO

Situações de incêndios nas edificações são consideradas ações excepcionais, mas quando acontecem, em qualquer fase da vida útil, podem causar danos severos e redução nas propriedades mecânicas dos materiais estruturais como, por exemplo, na resistência à compressão do concreto. Neste contexto, as estruturas podem ser investigadas quanto a sua integridade pós-incêndio utilizando ensaios destrutivos ou não destrutivos. A primeira técnica, em que há a extração de corpo de prova da estrutura que já foi danificada devido às altas temperaturas, o método pode ser ainda mais prejudicial. Por esta razão, este trabalho tem como objetivo abordar a utilização de um método não destrutivo para a determinação da resistência do concreto, tema importante na área de diagnóstico estrutural, extraindo informações por meio da correlação dos resultados do método da velocidade de propagação de

ondas ultrassônicas com os resultados de ensaios em prensa hidráulica de rompimento de corpos de prova de concreto. Para tanto, foram expostas amostras de concretos de diferentes classes (20, 30 e 50 MPa), com idades de 7, 21 e 28 dias, a diversos patamares de temperatura (150°C, 300°C, 450°C, 600°C, 750°C e 900°C), resfriados lentamente e bruscamente (submersos em água), para ensaio da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, com posterior ensaio destrutivo à compressão. Os resultados obtidos demonstram que o método de ensaio não destrutivo é adequado para a obtenção de correlações de resistência à compressão do concreto e de velocidade do som, permitindo sua utilização em situações de análise de resistência residual em concretos expostos a situações de incêndio.

**PALAVRAS-CHAVE:** Concreto em incêndio, Ensaio não destrutivo, Ações excepcionais.

## DETERMINATION OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE EXPOSED TO HIGH TEMPERATURES BY THE PROPAGATION VELOCITY OF ULTRASONIC WAVES METHOD

### ABSTRACT

Fire situations in buildings are considered exceptional actions, but when they occur, at any stage of their lifespan, they can cause severe damage and a reduction in the mechanical properties of structural materials such as, for example, the compressive strength of concrete. In this context, the structures can be investigated for their post-fire integrity using destructive or non-destructive tests. The first technique, in which the specimen is extracted from the structure that has already been damaged due to high temperatures, the method can be even more dangerous. For this reason, this work aims to address the use of a non-destructive method for determining the strength of concrete, an important topic in the area of structural diagnosis, extracting information through the correlation of

the results of the ultrasonic wave propagation speed method. with the results of tests on a hydraulic press breaking concrete specimens. For this purpose, concrete samples of different classes (20, 30 and 50 MPa), aged 7, 21 and 28 days, were exposed to different temperature levels (150°C, 300°C, 450°C, 600°C, 750°C and 900°C), cooled slowly and abruptly (submerged in water), for testing the propagation speed of ultrasonic waves, with subsequent destructive compression test. The results obtained demonstrate that the non-destructive test method is suitable for obtaining correlations of resistance to concrete compression and speed of sound, allowing its use in situations of residual resistance analysis in concretes exposed to fire situations.

**KEYWORDS:** Concrete in a fire situation, Non-destructive tests, Exceptional actions.



## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material estrutural mais empregado no mundo e possui como características principais a sua boa resistência à compressão, facilidade em ser moldado, resistência aos agentes atmosféricos e ao desgaste mecânico além de fácil constituição, em todos os tipos de obras, a partir de matérias-primas de custos relativamente menores em relação a outros materiais estruturais.

Entretanto, sua resistência à compressão, fundamental para a garantia de desempenho e segurança nos projetos estruturais, é dependente de fatores como o controle de qualidade de produção, fator água-cimento, proteção contra patologias e avaliação de seu desempenho em virtude de diferentes situações que possam ocorrer nas edificações durante sua vida útil como, por exemplo, a ocorrência de incêndios que, embora seja considerada uma ação (no sentido de solicitação) excepcional, qualquer fase da vida útil de uma construção pode estar sujeita a eles (Moreira, 2013). Mesmo que o concreto possa apresentar bom desempenho nessas situações por ser material incombustível, não liberar gases tóxicos e ter baixa condutividade térmica, ainda assim ele sofre redução das propriedades mecânicas, como da resistência à compressão, pelos fenômenos físicos e químicos que surgem durante o incêndio (Oliveira, 2006).

Para a avaliação da resistência à compressão desse material, “*in loco*”, situação por vezes necessária em qualquer situação de investigação de desempenho, seja até mesmo independente de ocorrência de qualquer tipo de sinistro, existem duas formas que se diferem pelas características dos ensaios que as constituem: ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos (END). O ensaio destrutivo consiste em retirar amostras do concreto “*in situ*” e posteriormente romper em ensaios de compressão. Já os END, que consistem na aplicação de equipamentos específicos para aquisição de informações como resistência do concreto, profundidade, localização e estado da armadura, além de condições físicas e parâmetros que estão associados aos processos de deterioração dos elementos, possuem a vantagem de poderem ser realizados em uma maior quantidade de elementos e relativa rapidez em relação aos ensaios destrutivos não causando, também, danos ao elemento estrutural.

Como desvantagem, segundo Machado (2005), os END exigem considerável cuidado na análise dos dados coletados (por exemplo, resistência à compressão do concreto e velocidade de propagação do som), com correlação adequada entre eles, pois são vários os fatores que podem interferir nos resultados das análises. Já os ensaios destrutivos possuem a desvantagem de serem pontuais, ou seja, os testemunhos são retirados em determinados pontos do elemento estrutural, para que não ocorra comprometimento da resistência e da estabilidade, com número restrito de amostras, que conseqüentemente pode diminuir a confiabilidade dos resultados.

Existem diversos ensaios não destrutivos para análise de estruturas de concreto como, por exemplo, método esclerométrico, método da maturidade, método de termografia infravermelha e o método da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (longitudinais). Neste trabalho, especificamente, se analisará a eficácia do método para a determinação da resistência à compressão em concreto submetido a altas temperaturas, correlacionando as velocidades de propagação obtidas por meio do aparelho de ultrassom com os valores de resistências oriundos dos ensaios à compressão em prensa hidráulica, em concretos de classes



C20, C30 e C50 após serem expostos a diversos patamares de temperaturas, até o limite de 900°C, visando a obtenção de parâmetros de correlação e de resistência à compressão de concretos submetidos à situação de incêndio, gerando conhecimento metodológico para o emprego em situações de avaliação de desempenho estrutural pós-incêndio.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são apresentados alguns conceitos sobre os END e, também, sobre incêndio.

### 2.1 Ensaios não destrutivos

Os END aplicáveis em elementos estruturais de concreto podem ser classificados de duas maneiras distintas: a) Ensaios que realizam a medição de alguma propriedade do concreto como, por exemplo, resistência, durabilidade e propriedades elásticas do material. Esse será o tipo de END empregado neste trabalho e, b) ensaios em que determinam posições, tamanhos e condições das armaduras, áreas de mau adensamento, vazios, fissuras, etc.

De acordo com Bungey (2006) as primeiras publicações a respeito de medições da velocidade de pulsos gerados mecanicamente no concreto apareceram em meados de 1940, nos EUA. Verificou-se que a velocidade depende principalmente das propriedades elásticas do material e é quase independente da geometria. Depois, no Canadá e Reino Unido foram realizados ensaios utilizando transdutores eletroacústicos, oferecendo maior controle sobre o tipo e frequência dos pulsos gerados, variando a frequência entre 20-150 kHz, servindo como base para o desenvolvimento do método para se determinar a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas utilizado atualmente, tornando-se amplamente aceito, permitindo o início da produção dos equipamentos hoje utilizados (Chies & Law, 1983). O método (Chies, 2014) consiste em aplicar um pulso ultrassônico em uma determinada face da peça utilizando um transdutor emissor e captar esse pulso em outra face através de um transdutor receptor, como exemplificado na Figura 1.

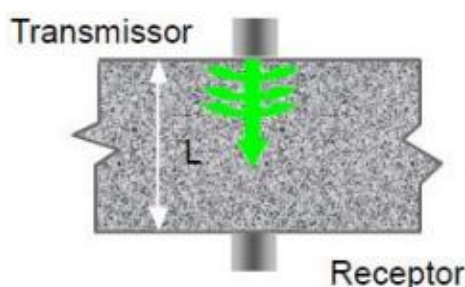


Figura 1 – Princípio de operação (Lopes, 2016).

De posse da distância entre os transdutores e o tempo decorrido entre a emissão e recepção do pulso, pode-se obter a velocidade média da propagação da onda ultrassônica, representado pela Equação (1), conforme NBR 8802 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013):

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

em que V é a velocidade média de propagação do pulso ultrassônico (m/s), L é a distância entre os transdutores (m) e T representa tempo entre emissão e recepção da onda (s).

Entretanto, a velocidade média da propagação das ondas de pulso ultrassônico quando transitam em um material sólido, depende diretamente da densidade e das propriedades elásticas do material, conforme Equação (2) (Bungey, 2006):

$$V = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}} \quad (2)$$

Onde:

$$K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3)$$

Nas Equações (2) e (3), V é a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em (m/s),  $E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico em (MPa),  $\rho$  é a massa específica em ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson dinâmico com valor de 0,2, conforme NBR 6118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

De maneira geral, de acordo com Malhotra e Carino (2004), o equipamento utilizado para o método do ultrassom traz vantagens como o fácil manuseio, permite a realização rápida das medidas das velocidades dos pulsos ultrassônicos com custo relativamente baixo, não afeta a utilidade e a durabilidade do elemento avaliado por ser completamente não destrutivo, permitindo a avaliação em diferentes idades. Porém, existem algumas limitações para o método como, por exemplo, a sensibilidade do acoplamento entre os transdutores e o concreto, podendo acarretar erro na determinação do tempo de propagação da onda de ultrassom. Um outro fator que merece muita atenção é a interpretação dos resultados, pois requer experiência de quem faz a leitura na consideração de diversos fatores que podem influenciar nas velocidades obtidas e resultar em conclusões errôneas. Segundo Phoon, Wee e Loi (1999) devido a influência das propriedades, proporções dos materiais constituintes, idade e teor de umidade do concreto, não existe uma relação teórica entre resistência e velocidade de propagação, sendo necessário estabelecer uma curva de correlação entre essas medidas.

Segundo a NBR 8802 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013) são fatores que influenciam nos resultados do ensaio: distância entre os transdutores, presença de armadura (principalmente no sentido de propagação da onda), densidade do concreto (depende do traço e condições de concretagem), agregados (tipo, densidade e outras características), tipo de cimento e grau de hidratação, direção de ensaio da peça, tipo de adensamento e idade do concreto.

Sobre a estimativa de resistência à compressão do concreto à partir da velocidade de propagação da onda ultrassônica, a Norma da RILEM NDT 1 (1972), *The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*, sugere duas formas: a partir de gráficos que correlacionem a resistência à compressão do concreto e a velocidade de propagação ultrassônica ou, a segunda forma, utilizando-se expressões empíricas, já conhecidas, que correlacionam essas duas variáveis com ajustes em dados experimentais. Porém, de maneira

geral, os gráficos de correlações apresentam resultados mais confiáveis do que as expressões analíticas.

## 2.2 O Incêndio

O incêndio é compreendido como uma forma de combustão, sendo necessária uma combinação de material combustível, gás comburente e fonte fornecedora de calor, para que o mesmo se inicie. Ocorre um aumento brusco da temperatura quando as superfícies de todos os elementos do ambiente entram em ignição, posteriormente a velocidade de combustão acentua-se naturalmente e com a escassez de combustível o processo vai desacelerando e diminuindo as proporções (Souza, 1996). Segundo Alva (2000), o incêndio pode ser dividido em três fases: ignição, fase de aquecimento e fase de resfriamento. Entre as fases de ignição e de aquecimento, ocorre o fenômeno do *flashover* que, segundo Cuoghi (2006), é o ponto onde ocorre a liberação de gases combustíveis com mudança súbita de temperatura, atingindo faixas em torno de 600°C.

Entretanto, Silva (2003) ressalta que como a velocidade de combustão é função do material e das condições ambientais, essas podem ter bastante variação em relação a duração e magnitude. Já as estruturas de concreto, quando submetidas ao incêndio, apresentam certa durabilidade, pois o concreto é incombustível, possui baixa condutividade térmica e não exala gases tóxicos quando submetidos ao fogo (Costa e Silva, 2002). Porém, as altas temperaturas podem causar transformações e degradações significativas no comportamento do mesmo (Lima, 2005).

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos desta pesquisa, foi realizado um conjunto de ações metodológicas para se avaliar os efeitos de altas temperaturas no concreto, especificamente analisando-se a influência na resistência à compressão de acordo com a classe, a idade (7, 21 e 28 dias), diferentes temperaturas e, ainda, da forma de resfriamento, comparando-se os resultados obtidos através do método não destrutivo com os oriundos dos ensaios destrutivos.

### 3.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

Foram utilizados concretos com resistências características ( $f_{ck}$ ) à compressão, aos 28 dias, de 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa. As moldagens dos corpos de prova de concreto foram realizadas conforme a NBR 5738 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015), em etapas, divididas pela classe de concreto. A dosagem dos concretos foi realizada conforme recomendações da NBR 7212 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012), para as classes de 20 MPa e 30 MPa, e pela NBR 12655 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015), para a classe de 50 MPa.

Para a produção desses concretos foi utilizado cimento Portland – CII F 40, agregado graúdo de origem basáltica, agregado miúdo natural de origem quartzosa. Todos os materiais citados anteriormente são da região de Umuarama-PR. Também foi usado aditivo Mastermix BF 38 Polifuncional que propicia redução de água na composição, sem alterar o tempo de pega. Para cada classe de resistência foram moldados 126 (cento e vinte e seis) corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, sendo que em cada idade analisada foram expostos 6 testemunhos em 7



diferentes temperaturas, que resultou em 42 (quarenta e dois) corpos de prova por idade. Ao todo foram moldados 378 (trezentos e setenta e oito) corpos de prova para as três classes.

### 3.2 Exposição a altas temperaturas e resfriamento

Os corpos de prova com idades de 7, 21 e 28 dias, para todas as três classes de resistências, foram submetidos a elevadas cargas de temperatura em um forno nas dependências da Universidade Estadual de Maringá, Campus Umuarama, da marca Jung, modelo 7013, com limite de temperatura de 1300°C. Em cada idade foram submetidos 6 (seis) corpos de prova para 7 (sete) patamares diferentes de temperatura, sendo eles: temperatura ambiente (de referência), 150°C, 300°C, 450°C, 600°C, 750°C e 900°C.

A partir do momento em que se atinja o patamar da temperatura desejado, era necessário manter essa temperatura por mais 30 minutos e, após, os corpos de prova eram separados em dois grupos, três a três: os que passariam pelo resfriamento brusco (colocados em um recipiente com água em temperatura ambiente, por 60 minutos) e os de resfriamento lento (deixados em temperatura e umidade ambiente desde o momento da retirada do forno).

### 3.3 Ensaio de ultrassom

Após 24 horas da retirada dos corpos de prova do forno, foram realizados os ensaios de velocidade de propagação da onda ultrassônica, utilizando o equipamento de ultrassonografia da marca Proceq, modelo PunditLab e frequência de 54 kHz e transdutores com diâmetro de 50 mm. O aparelho foi calibrado antes de cada ensaio. As leituras de ultrassom foram realizadas do modo de transmissão direta, de acordo com a NBR 8802 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013) determinando-se o tempo em que a onda ultrassônica retarda em atravessar o elemento de concreto, do transdutor emissor ao transdutor receptor.

Todas as peças ensaiadas foram previamente limpas e secas superficialmente, posteriormente medido exatamente o comprimento do corpo de prova de concreto, distância em que a onda ultrassônica irá percorrer. Em seguida, posiciona-se o transdutor emissor em uma face e o transdutor receptor em outra, alinhados entre si e acoplados com vaselina, resultando na velocidade do pulso ultrassônico. Foram realizadas 3 (três) leituras em cada corpo de prova e em seguida obteve-se a média. A velocidade da propagação da onda ultrassônica para cada caso estudado se deu pela média obtida em 3 (três) corpos de prova (Forigo, 2017).

### 3.4 Ensaio à compressão

Na sequência do ensaio de ultrassom, realiza-se o ensaio à compressão nos corpos de prova em prensa hidráulica do laboratório do Departamento de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, da marca EMIC, modelo PC200C, com capacidade de carga de 200.000 kgf (2MN), com leitura automática da força aplicada. Para a determinação da resistência característica à compressão dos corpos de prova já ensaiados de maneira não destrutiva, seguiu-se os procedimentos recomendados na ABNT NBR 5739:2007.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com os ensaios à compressão em prensa hidráulica e com o aparelho de propagação das ondas ultrassônicas em corpos de prova de concreto submetidos ao aumento gradativo de temperatura, com análises e discussões, sobre as variáveis analisadas: classe de resistência, idade e forma de resfriamento. Em seguida, correlaciona-se os valores obtidos das velocidades ultrassônicas com as resistências obtidas com o método destrutivo (ensaio à compressão em prensa hidráulica).

### 4.1 Resistência à compressão verificada em prensa hidráulica

Foram ensaiados à compressão três corpos de prova para cada situação, ou seja, cada classe de resistência e idades, após serem expostos a diferentes patamares de temperatura, variando da temperatura ambiente até 900°C, sendo resfriados lentamente ou bruscamente. Calculou-se a média dos valores obtidos através do ensaio à compressão dos três corpos de prova, adotando-se o resultado médio como a resistência à compressão para cada caso.

#### 4.1.1 Efeito da classe do concreto

Foi analisado o efeito do aumento das temperaturas sobre as diferentes classes de concreto. Na Figura 3 estão indicadas, em porcentagem, as médias das resistências à compressão residuais para cada uma das classes, para todas as idades e tipos de resfriamentos.

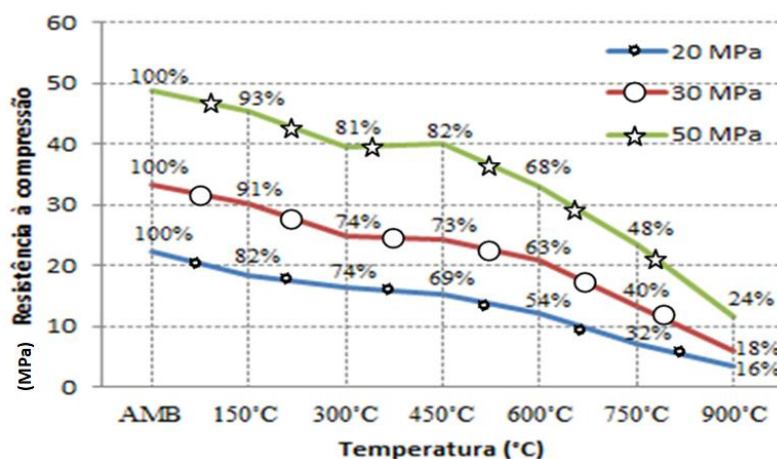


Figura 3 – Média em porcentagem das resistências à compressão residuais por classe de concreto

Observa-se na Figura 3 que para todas as classes de concreto na resistência à compressão ocorre um decréscimo acentuado na resistência à compressão entre a temperatura ambiente e 300°C, porém para o concreto de resistência à compressão de 50 MPa, a resistência residual percentual fica 7% mais alta que para os outros concretos, que mantiveram 74% da resistência. Entre as temperaturas de 300°C a 450 °C é possível perceber que há um patamar com pouca redução ou até um pequeno aumento, mas não apresentando diferenças significativas entre essas duas temperaturas. E, novamente, nota-se decréscimo, ainda mais acentuado, deixando o patamar de 450°C variando de 69% a 82% de resistência residual e chegando a 900°C com variação de 16% a 24%, reduzindo em média 55%.

É importante observar que a resistência à compressão residual foi superior nos concretos de maior  $f_{ck}$ , pois em qualquer patamar de temperatura o concreto de 50 MPa obteve a resistência residual maior que o concreto de 30 MPa e, por fim, o concreto de 30 MPa maior que o concreto de 20 MPa. Estudos experimentais realizados por Mohamedbhai (1986) atingiram intervalos de resistência residual na ordem de 77% a 85% na temperatura de 200°C, 68% a 83% na temperatura de 400°C, 48% a 69% na de 600°C e 29% a 34% à 800°C, ou seja, valores próximos aos resultados obtidos neste trabalho, para resfriamentos bruscos.

#### 4.1.2 Efeito da idade do concreto

Foram realizados ensaios para diferentes idades do concreto e os resultados são apresentados nas Figuras 4a a 4c. É possível perceber semelhança no comportamento do decréscimo de resistência entre as classes de concreto com o aumento de temperatura.

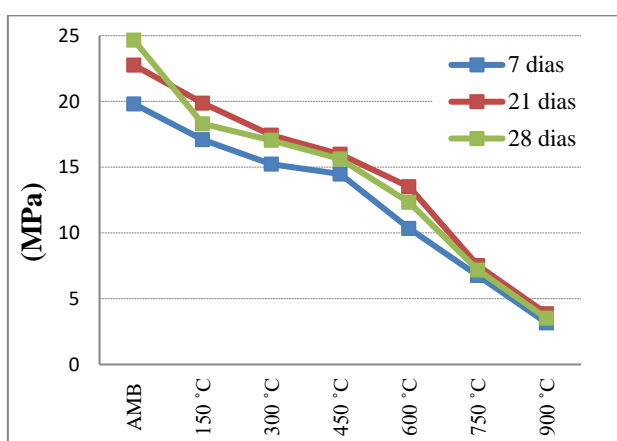


Figura 4a – Resistência à compressão do concreto de 20 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura.

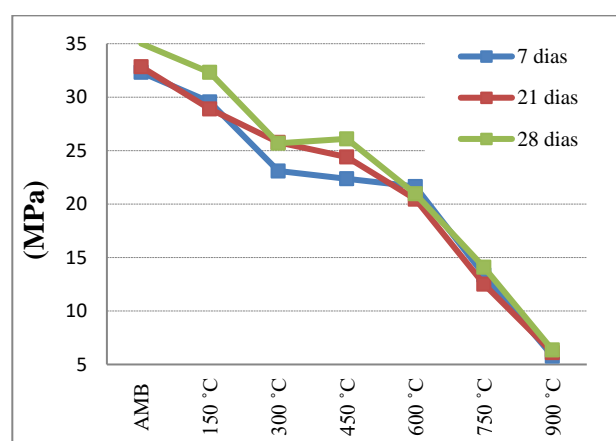


Figura 4b – Resistência à compressão do concreto de 30 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura.

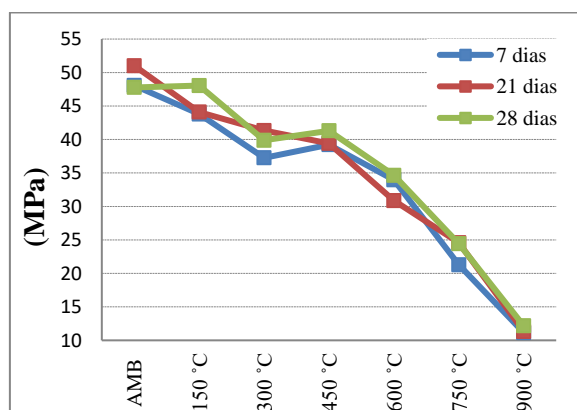


Figura 4c – Resistência à compressão do concreto de 50 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura.

#### 4.1.3 Efeito da forma de resfriamento

Analisando a alteração nos valores das resistências à compressão de acordo com o aumento da temperatura, considerando a forma como os corpos de prova foram resfriados, levando em consideração a classe do concreto, tem-se os resultados apresentados nas Figuras seguintes, observando-se a maior perda de resistência à compressão nos concretos que sofreram



resfriamento brusco, imersos em água logo após serem expostos aos patamares de temperatura estudados. Na faixa de temperatura de 300°C a 600°C a diferença de resistência é ainda maior. Com a forma de resfriamento do tipo lento, na faixa entre 300°C e 450°C, houve um incremento na resistência à compressão.

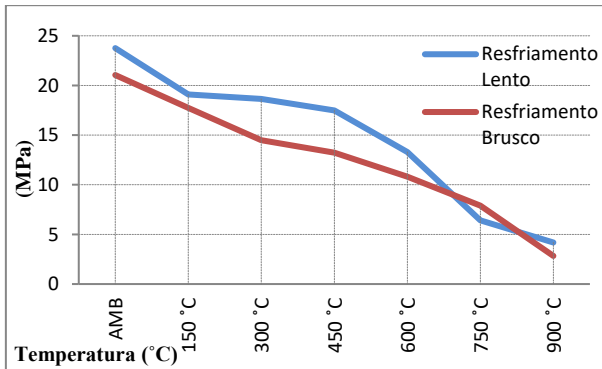


Figura 5a – Variação da resistência, conforme forma de resfriamento, para o concreto de 20 MPa.

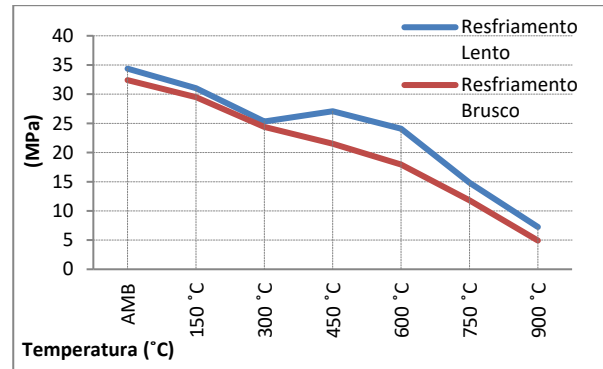


Figura 5b – Variação da resistência, conforme forma de resfriamento, para o concreto de 30 MPa.

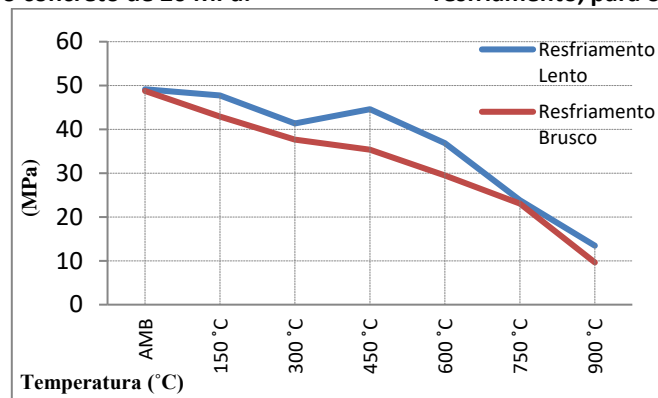


Figura 5c – Variação da resistência, conforme forma de resfriamento, para o concreto de 50 MPa.

Esse mesmo comportamento na resistência do concreto resfriado foi estudado por Wendt (2006), com resultados semelhantes e apresentados na Figura 6, evidenciando que a forma de resfriamento é um fator importante, mesmo porque pode representar a simulação da atuação de uma brigada de socorro na extinção de um sinistro sobre uma edificação (Souza & Moreno, 2010).

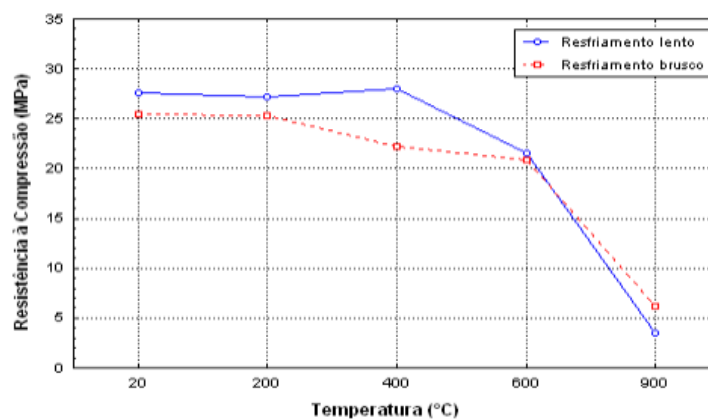


Figura 6 – Média das resistências à compressão por tipo de resfriamento (Wendt, 2006).



## 4.2 Determinação das velocidades das ondas ultrassônicas nos corpos de prova

Determinou-se as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas nos corpos de prova, expostos a diferentes patamares de temperaturas, alterando-se a classe e idade do concreto, bem como a forma de resfriamento. Foi realizada a média de 3 (três) leituras de velocidade ultrassônica realizadas em cada corpo de prova, posteriormente calculando-se a média das velocidades dos 3 (três) corpos de prova de cada situação, sendo adotada a última como a velocidade ultrassônica para cada caso.

### 4.2.1 Efeito da classe do concreto

Considerando-se apenas o efeito da temperatura, nota-se nos resultados médios para cada classe apresentados na Figura 7, que a velocidade da onda ultrassônica sofre um decréscimo gradativo (em relação ao valor de referência) quando os corpos de prova são expostos a patamares de temperaturas mais elevados, o que indica um aumento na degradação do concreto, com o calor provavelmente alterando a microestrutura do material e, como consequência direta, sua massa específica e a redução na velocidade de propagação do som.

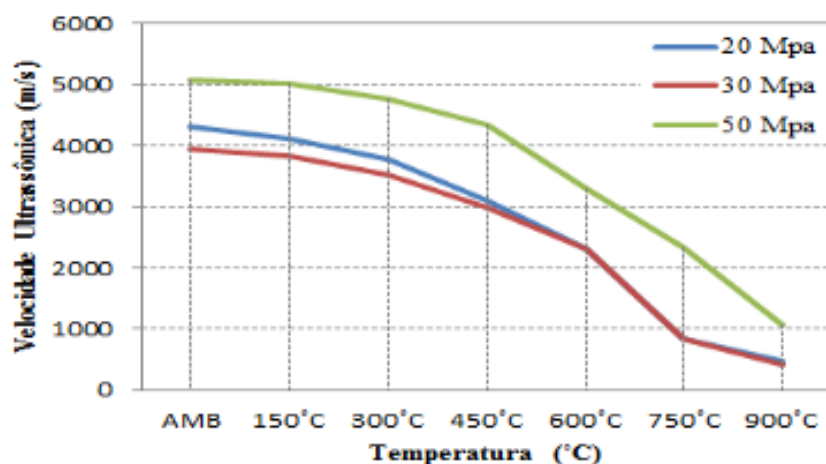


Figura 7– Média das velocidades das ondas de ultrassom por classe de concreto

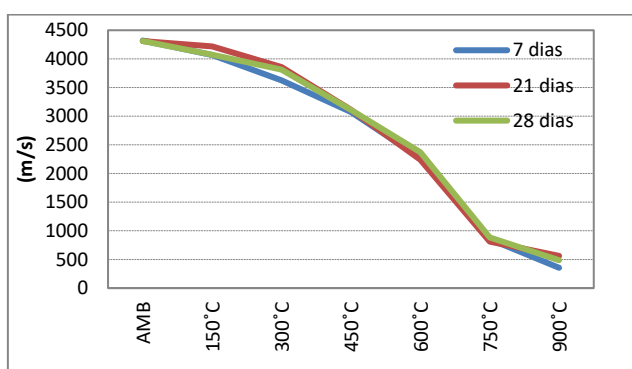
Observa-se também que as velocidades ultrassônicas, das três classes de concreto, possuem a mesma tendência de decréscimo, com linhas bem semelhantes. É possível notar que até aproximadamente 600°C, a média dos resultados para a classe C20 foi mais elevada que para a classe de C30. Comparando-se os resultados aqui obtidos com os resultados dos trabalhos de Wendt (2006), de Lima, Caetano e Silva Filho (2004) e Silva (2009), para concretos até 30 MPa, constata-se boa concordância entre os valores de velocidade residual, conforme Tabela 1:

**Tabela 1 - Proporção residual aproximada entre a velocidade das ondas em três temperaturas em relação a velocidade na temperatura de referência (AMB)**

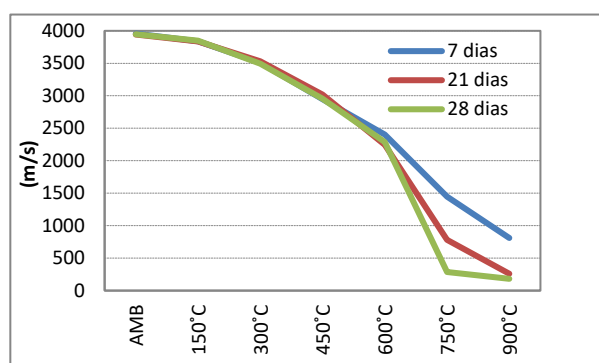
Autor	Proporção residual da velocidade de onda ultrassônica		
	400°C	600°C	900°C
Presente estudo	82%	52%	12 %
Lima et al. (2004)	85%	49%	15%
Silva (2009)	83%	58%	13%
Wendt (2006)	87%	54%	10%

#### 4.2.2 Efeito da idade do concreto

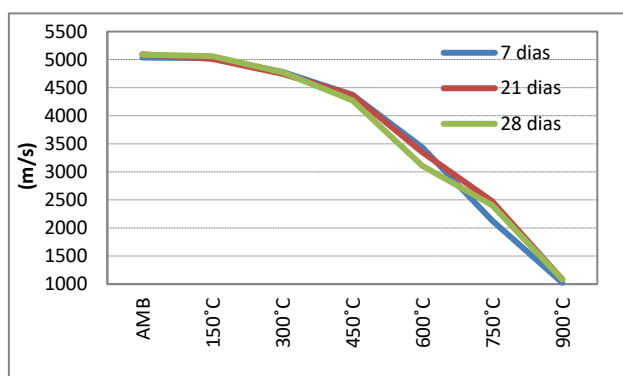
Considerando-se as leituras para as três diferentes idades do concreto, observa-se facilmente a semelhança de valores de velocidades nas Figuras 8a a 8c, inclusive para as três classes de concreto também, não sendo possível verificar diferenças significativas das velocidades para as diferentes idades.



**Figura 8a – Velocidade ultrassônica do concreto de 20 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura**



**Figura 8b – Velocidade ultrassônica do concreto de 30 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura**



**Figura 8c – Velocidade ultrassônica do concreto de 50 MPa conforme sua idade e aumento de temperatura**

#### 4.2.3 Efeito da forma de resfriamento

Apenas considerando a forma como os corpos de prova foram resfriados, as velocidades das ondas de ultrassom, com os valores das classes do concreto, têm-se os valores apresentados na Figura 9. Diferentemente do que foi constatado, para essa mesma variável, na análise da resistência à compressão com o uso da prensa hidráulica, houve pouca influência da forma como

foram resfriados os concretos sobre as velocidades das ondas. Isso pode ser explicado, provavelmente, devido a influência da umidade na velocidade de propagação das ondas.

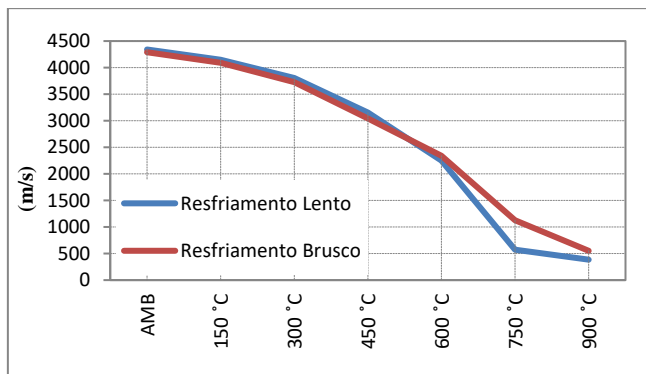


Figura 9a – Velocidade ultrassônica, conforme forma de resfriamento, classe de 20 MPa.

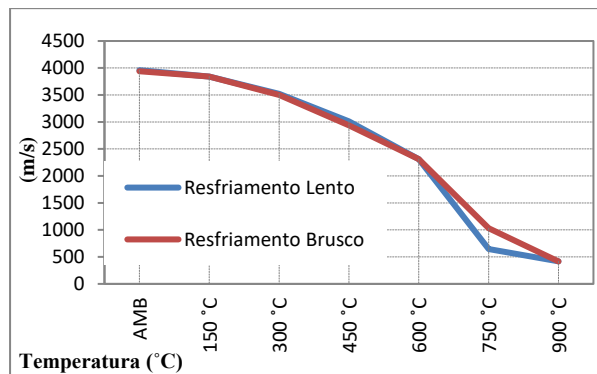


Figura 9b – Velocidade ultrassônica, conforme forma de resfriamento, classe de 30 MPa.

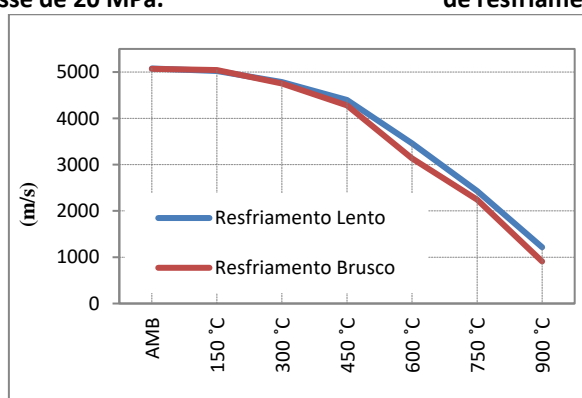


Figura 9c – Velocidade ultrassônica, conforme forma de resfriamento, classe de 50 MPa.

#### 4.3 Correlação entre velocidade das ondas ultrassônicas e a resistência à compressão

As resistências à compressão são estimadas a partir das velocidades de ondas ultrassônicas por meio de curvas de correlação entre as duas variáveis. Para tanto, foram determinadas as curvas de correlação, utilizando-se modelos de ajuste para os dados obtidos, com as regressões do tipo exponencial, linear, logarítmica, polinomial de 2° grau e potência.

Na Tabela 2 são mostrados os resultados ajustados pelos cinco modelos, sendo que o valor do coeficiente de correlação (R), que mede o grau de ajuste dos dados em relação ao tipo de equação admitida para a estimativa, apresentou melhor resultado para a curva de ajuste do tipo exponencial ( $R = 0,859$ ), por ser este coeficiente, entre todos, o mais próximo de 1. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica que o modelo pode explicar 74% da variação dos dados.

Tabela 2 – Curvas para correlação da resistência à compressão e a velocidade de ondas ultrassônicas

Método de ajuste	Equação	R <sup>2</sup>	R
Exponencial	$y = 5,8692e^{0,0004x}$	0,7388	0,859
Linear	$y = 0,0072x + 1,7898$	0,6945	0,833
Logarítmica	$y = 10,952\ln(x) - 61,582$	0,5245	0,724
Polinomial	$y = 1E-06x^2 + 0,0007x + 7,5533$	0,7313	0,855
Potência	$y = 0,1135x^{0,6614}$	0,6753	0,822

Na Figura 10 são apresentados graficamente os dados das velocidades ultrassônicas em relação a resistência à compressão e curva de ajuste do tipo exponencial.

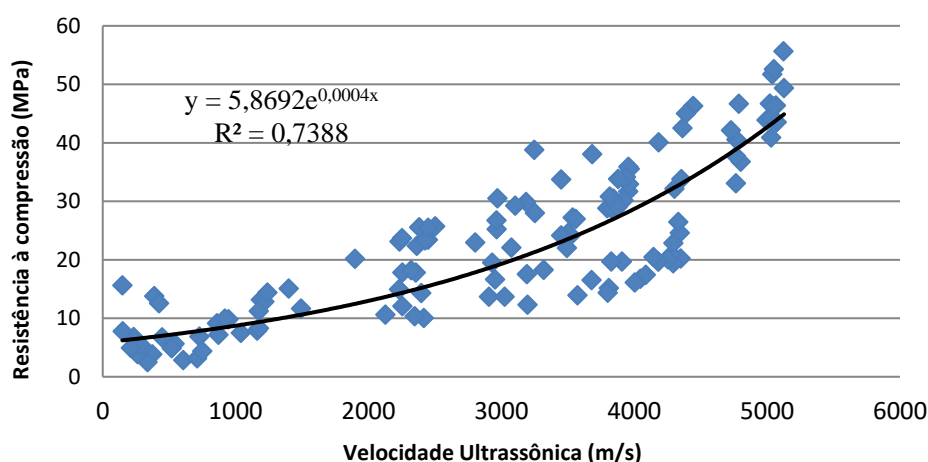


Figura 10 – Curva de correlação entre velocidades ultrassônicas e resistências à compressão.

O valor do coeficiente de correlação obtido para a curva de ajuste do tipo exponencial indica que, com esse o modelo de previsão da resistência à compressão, a partir dos dados ensaiados de velocidade ultrassônica, conduz a estimativas da resistência à compressão com maior dispersão dos dados no gráfico (entre 2000 m/s e 4000 m/s), podendo se dar pela forma como as variáveis independentes neste estudo interferem na resistência à compressão e na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas.

Por isso, buscando um melhor coeficiente de correlação, foram verificadas diferentes curvas de ajuste para cada classe de concreto separadamente, obtendo-se para 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa as mais adequadas sendo, respectivamente, as curvas do tipo polinomial ( $R = 0,943$ ), polinomial ( $R = 0,934$ ) e potência ( $R = 0,978$ ), conforme a Figura 11.

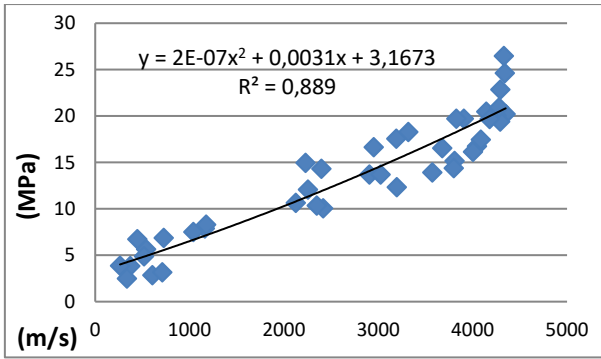


Figura 11a-Curva de correlação - classe 20 MPa – curva tipo potência (R = 0,943)

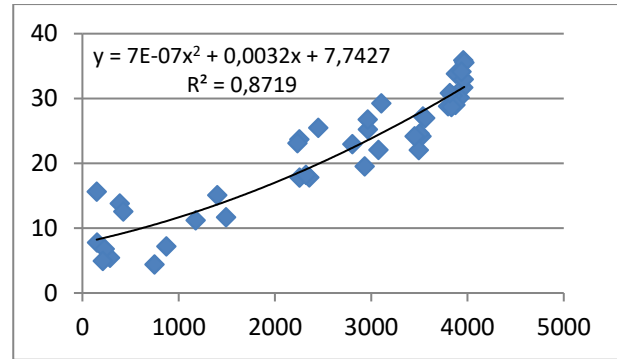


Figura 11b-Curva de correlação - classe 30 MPa – curva tipo polinomial (R = 0,934)

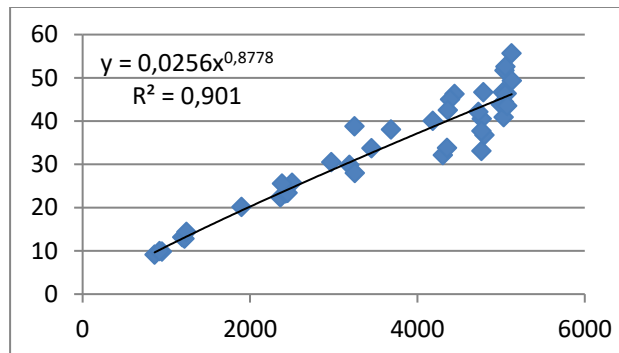


Figura 11c - Curva de correlação - classe 50 MPa – curva tipo potência (R = 0,978)

Levando-se em consideração a classe do concreto e a forma de resfriamento adotada, têm-se para os concretos de classes 20 MPa, 30 MPa e 50 MPa, primeiramente com o resfriamento lento, as curvas de ajuste do tipo potência (R = 0,979), polinomial (R = 0,934) e potência (R = 0,982), respectivamente, apresentadas nas Figuras 12.

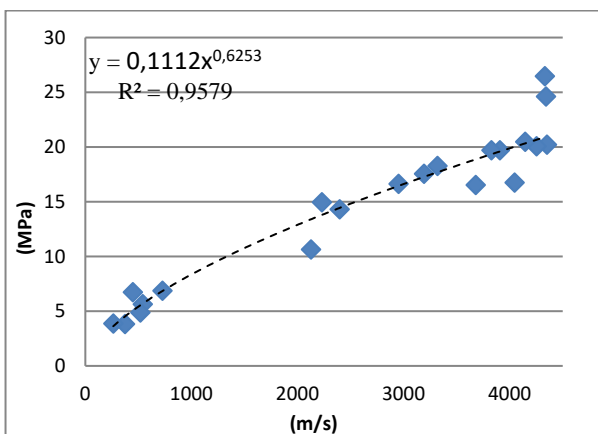


Figura 12a - Curva de correlação - classe 20 MPa – Resfriamento lento-curva tipo potência (R = 0,979)

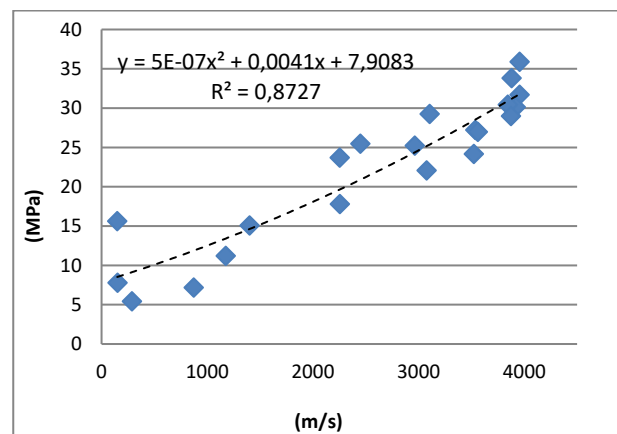


Figura 12b - Curva de correlação - classe 30 MPa – Resfriamento lento - curva tipo polinomial (R = 0,934)



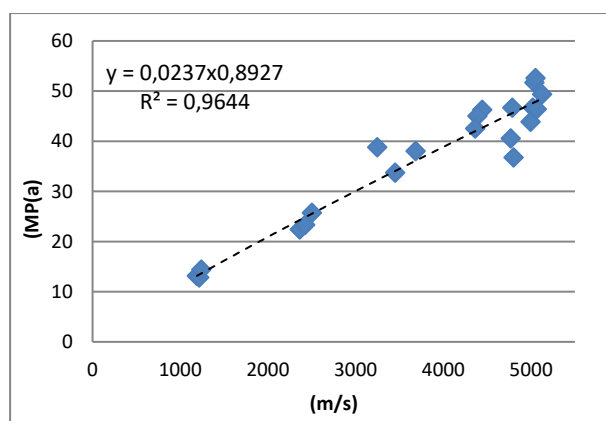


Figura 12c - Curva de correlação - classe 50 MPa – Resfriamento lento - curva tipo potência (R = 0,982)

Para os cilindros de concreto com resfriamento do tipo brusco, as melhores curvas de ajuste foram do tipo potência (R = 0,967), polinomial (R = 0,937) e potência (R = 0,981), respectivamente por classe de concreto, (Figura 13).

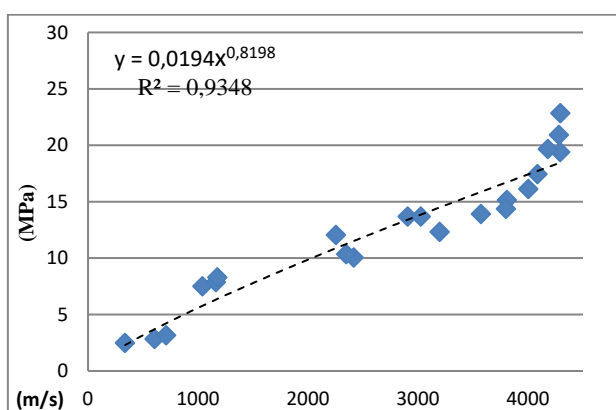


Figura 13a - Curva de correlação - classe 20 MPa – Resfriamento brusco-curva tipo potência (R = 0,967)

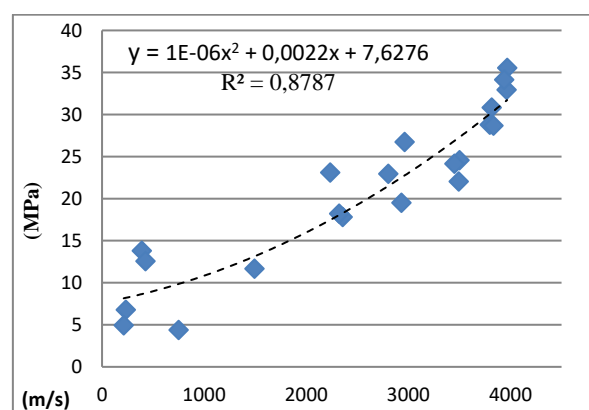


Figura 13b - Curva de correlação - classe 30 MPa – Resfriamento brusco-curva tipo potência (R = 0,937)

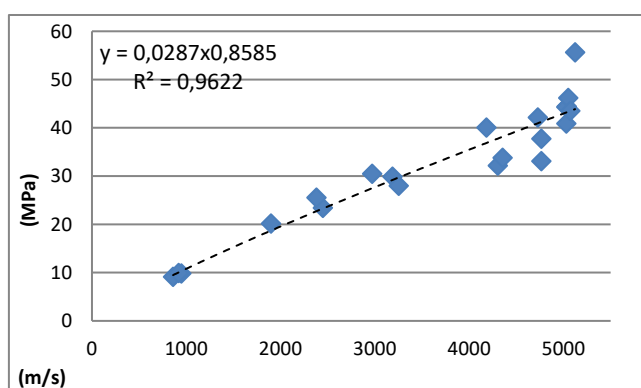


Figura 13c - Curva de correlação - classe 50 MPa – Resfriamento Brusco-curva tipo potência (R = 0,981).

#### 4.4 Resistências à compressão obtidas pelo método da velocidade de propagação da onda ultrassônica

Conforme os modelos de regressão, para o método de ultrassom, apresentados no item 4.3, foram elaborados gráficos (Figuras 14, 15 e 16) apresentando os valores obtidos de resistências à compressão resultantes dos ensaios à compressão comparados com as resistências

estimadas pelas regressões que apresentam os melhores resultados, para cada caso analisado (conforme a classe do concreto, patamar de temperatura exposto, idade do concreto e forma de resfriamento), é possível verificar que a técnica que mede a velocidade da propagação da onda ultrassônica resulta em bons resultados, próximos aos obtidos pelo ensaio de rompimento de corpos de prova, seguindo a mesma tendência de aumento ou diminuição.

Assim, na Figura 14, estão apresentados os valores médios de resistências à compressão calculados a partir das medidas de velocidades de ultrassom aplicadas na curva de correlação  $y = 2E-07x^2 + 0.0031x + 3.1673$ , que foi a que melhor se ajustou para o concreto de 20 MPa.

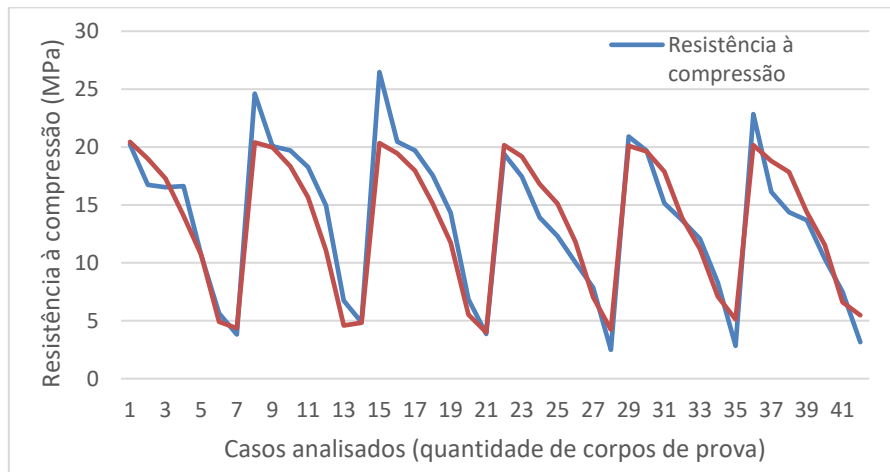


Figura 14 – Resistências à compressão comparadas - Ensaio destrutivo e END (obtida pela melhor curva de ajuste do concreto de classe 20 MPa).

Para a classe de 30 MPa, com valores oriundos da curva que melhor se ajustou ( $y = 7E-07x^2 + 0.0032x + 7.7427$ ) tem-se os valores apresentados na Figura 15:

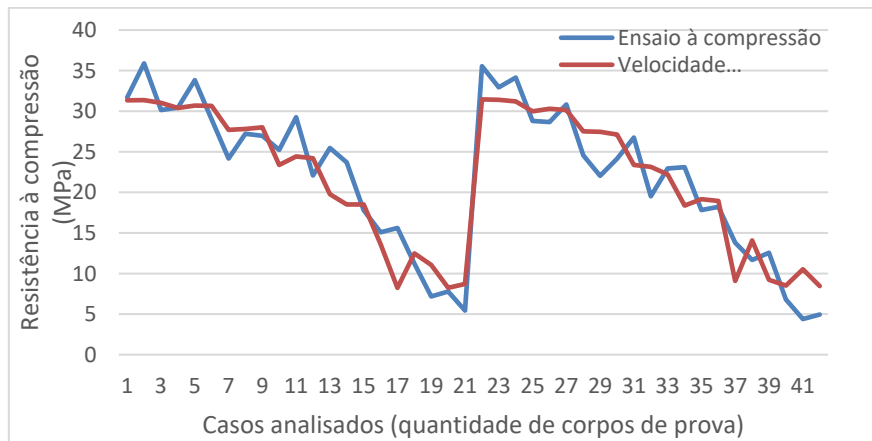


Figura 15 – Resistências à compressão comparadas - Ensaio destrutivo e END (obtida pela melhor curva de ajuste do concreto de classe 30 MPa)

Para a classe de 50 MPa, com valores oriundos da curva que melhor se ajustou ( $y = 0.0256x^{0.8778}$ ) tem-se os valores apresentado na Figura 16:





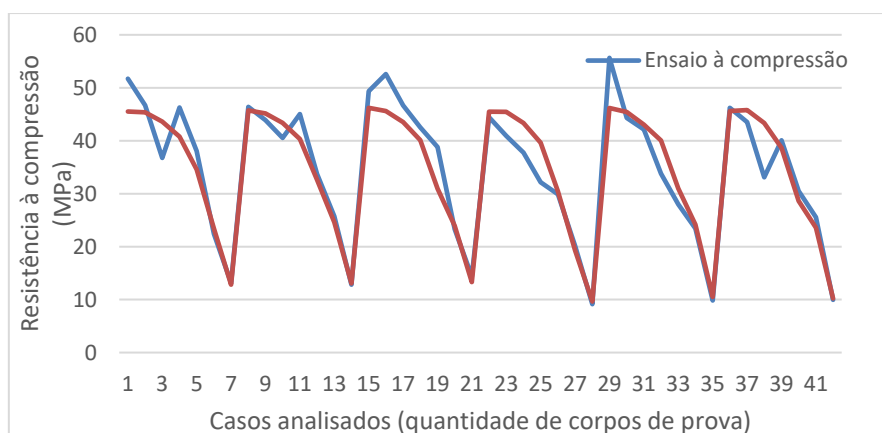


Figura 16 – Resistências à compressão comparadas - Ensaio destrutivo e END (obtida pela melhor curva de ajuste do concreto de classe 50 MPa)

## 5 CONCLUSÃO

Analisando-se o efeito da temperatura de exposição sobre as amostras de concreto analisadas neste trabalho, verificou-se que ela influenciou significativamente, a medida em que aumentou, na redução das resistências à compressão, tanto as obtidas com o ensaio em prensa hidráulica, como as que foram determinadas com a técnica de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

Os modelos de curvas ajustadas para as relações entre a velocidade de propagação de ondas com a resistência à compressão mostraram bons níveis de correlação quando o estudo é conduzido com as variáveis isoladamente (correlação realizada por classe de concreto, idade ou tipo de resfriamento), conforme podem ser observados nos gráficos de resistência *versus* velocidades apresentados.

Por fim, podem-se confirmar, a partir dos resultados obtidos neste trabalho, que a metodologia de detecção de resistência com o uso de aparelho de medição de velocidades de ondas ultrassônicas se mostra potencial para o emprego na construção civil, principalmente na área de diagnóstico de danos após a ocorrência de sinistros ou de outros tipos de patologias em estruturas de concreto.

## 6 REFERÊNCIAS

- Alva, G. M. S. (2000). *Sobre o Projeto de Edifícios em Estrutura Mista Aço-Concreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007). **ABNT NBR 5739**: Ensaio de Compressão de corpos de Prova Cilíndricos de Concreto. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). **ABNT NBR 7212**: Execução de Concreto Dosado em Central. Rio de Janeiro, 2012.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultrassônica: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). **ABNT NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). **ABNT NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro.
- Bungey, J. H. (2006). *The Testing of Concrete in Structures*. 4. ed. Londres: Taylor & Francis.
- Chies, J. A. (2014). *Ensaio Não Destrutivo em Concreto: Detecção de Falhas no Interior de Estruturas de Concreto com o Uso de Ultrassom*. Dissertação Mestre em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Chung, H.W, Law, K. S. (1986). Diagnosing in Situ Concrete by ultrasonic Pulse Technique. *Concrete International (10)*, v. 5, p. 42 – 49.
- Costa, C. N.; Silva, V. P. (2002). Estruturas de concreto armado em situação de incêndio. In: *Anais do XXX Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estrutural*, Brasília.
- Cuoghi, R. S. (2006). *Aspectos de Análise de Risco das Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio*. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Forigo C. (2017). *Determinação da resistência à compressão em concretos expostos a altas temperaturas por meio de ensaios não destrutivos*. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá.
- Lima, R. C. A; Caetano, L. F; Silva Filho, L. C. P. (2004). Mapeamento de concretos aquecidos por meio de ondas ultrassônicas. In: *XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingenieria Estructural*, 2004, Mendoza.
- Lima, R. C. A. (2005). *Investigação do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas*. 257f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Machado, M. D. (2005). *Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Malhotra V. M; Carino N. J. (2004). *Nondestructive Testing of Concrete*. 2. ed. London: American Society for Testing and Materials.
- Mohamedbhai, G. T. G. (1986). Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete. *Magazine of Concrete Research*, v. 38, n. 136, p. 151 – 158, September.
- Moreira, A. M. M. (2013). *Verificação de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexão oblíqua composta em situação de incêndio*. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Oliveira, T. A. C. P. (2006). *Gerenciamento de riscos de incêndio: Avaliação do impacto em estruturas de concreto armado através de uma análise experimental de vigas isostáticas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife.



- Phoon, K. K.; Wee, T. H.; Loi, C. S. (1999). Development of statistical quality assurance criterion for concrete using ultrasonic pulse velocity method, *ACI Materials Journal*, p.568–574, set./out.
- Rilem. **NDT 1**: Testing of concrete by the ultrasonic pulse method. 1972.
- Silva, A. C. P. (2003). *Gerenciamento de riscos de incêndio em espaços urbanos históricos: uma avaliação com enfoque na percepção do usuário*. 203f. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Silva, D. S. (2009). *Propriedades mecânicas residuais após incêndio de concretos usados na construção civil na grande Florianópolis*. 102f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Souza, U. E. L. (1996). Incêndio em edifícios: Conceitos básicos. *Revista CIPA*, São Paulo, v.17, n.203, p.99-105.
- Souza. A. A. A.; MORENO JR. A. L. (2010). Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais (3)*, São Paulo, n. 4, p. 432-448.
- Wendt, S. C. (2006). *Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica*. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

#### COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Vanalli, L., Forigo, C., Lopes, Y. D. (2021). Determinação da resistência à compressão do concreto exposto a altas temperaturas pelo método de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. *Holos*. 37 (7), 1-20.

#### SOBRE OS AUTORES

##### L. VANALLI

Departamento de Tecnologia - DTC Centro de Tecnologia - CTC Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PCV Doutorado em Engenharia de Estruturas - EESC/USP.

E-mail: [ivanalli@uem.br](mailto:ivanalli@uem.br)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4695-9068>

##### C. FORIGO

Engenharia Civil - UTFPR-2014. Mestre em Engenharia Civil - UEM 2017

E-mail: [camila.forigo@hotmail.com](mailto:camila.forigo@hotmail.com)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8586-8524>

##### Y. D. LOPES

Engenheiro Civil - Unipar 2014. Mestre em Engenharia Civil - UEM 2016.

E-mail: [yuridanilolopes@yahoo.com.br](mailto:yuridanilolopes@yahoo.com.br)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7344-5383>



**Editor(a) Responsável:** Francinaide Nascimento

