

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA E DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE CONCRETOS CONVENCIONAIS E AUTOADENSÁVEIS SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

Evaluation of the resistance and the modulus of elasticity of conventional and self-consolidating concretes subjected to high temperature

Bárbara Gomes de Siqueira¹, Antônio Carlos Assis Leonel², Vitor Augusto Lopes de Lima³, Daniel de Lima Araújo⁴



PALAVRAS CHAVE:

Estruturas de concreto;
Incêndio;
Resistência à compressão;
Resistência à tração;
Módulo de Elasticidade.

KEYWORDS:

Concrete structures;
Fire;
Compressive strength;
Traction strength;
Modulus of elasticity.

RESUMO: No Brasil, cerca de 90% das estruturas das construções são feitas de concreto. Esse volume de execução não foi acompanhado da evolução das pesquisas sobre alguns temas específicos, como, por exemplo, quando em situação de incêndio. No Brasil, esse assunto é normatizado pelas normas NBR 14432:2001 e NBR 15200:2012, que são baseadas nas regulamentações internacionais Eurocode 1, Eurocode 2 e ISO 834. As normas internacionais possuem parâmetros de projeto que não foram incorporados às normas nacionais. Assim, é relevante o estudo dos concretos locais no sentido de complementar as normas nacionais com novos parâmetros de projeto. O objetivo desse trabalho é avaliar a influência da temperatura nas resistências à compressão e a tração e no módulo de elasticidade de dois concretos de média resistência, um convencional e outro autoadensável, quando submetidos a altas temperaturas. Para isso, foram realizados ensaios de resistências à compressão e a tração, bem como do módulo de elasticidade tangente inicial, em corpos de prova de concreto depois de submetidos a temperaturas de 200, 400 e 600°C.

ABSTRACT: In Brazil, about 90% of the structures of constructions are made of concrete. This great volume of concrete structures was not accompanied by the increase on researches about specific topics, such as concrete structures on fire condition. In Brazil, this subject is regulated by standards NBR 14432: 2001 and NBR 15200: 2012, which are based on the international regulations Eurocode 1, Eurocode 2 and ISO 834. However, the International standards have design recommendations that have not been incorporated into Brazilian standards. Thus, the study of local concretes in order to complement national standards with new design parameters is relevant. The main objective of this paper is to evaluate the influence of the high temperature on compressive and tensile strength and on the modulus of elasticity of two medium strength concretes, one conventional and one self-consolidating. For this, tests for compressive and tensile strength, as well as modulus of elasticity, were performed on cylindrical concrete specimens after being submitted to temperatures of 200, 400 and 600°C.

* Contato com os autores:

Publicado em 02 de dezembro de 2021

¹ e-mail: bdgsiqueira@gmail.com (B. G. Siqueira)

Graduanda de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás.

² e-mail: antonioleonel.eng@gmail.com (A. C. A. Leonel)

Engenheiro Civil, Técnico de Laboratório, Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás.

³ e-mail: vitorlopes.ufg@gmail.com (V. A. L. Lima)

Tecnólogo em Construção de Edifícios, Técnico de Laboratório, Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás.

⁴ e-mail: dlaraujo@ufg.br (D. L. Araújo)

Doutor em Estruturas, Professor Associado, Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás.

1. INTRODUÇÃO

Para o bom dimensionamento de estruturas de concreto armado e protendido em situação de incêndio, é necessário o conhecimento de suas propriedades termomecânicas e suas variações com a temperatura. As propriedades térmicas incluem condutividade térmica, massa específica, calor específico, alongamento térmico e difusividade térmica, sendo as três primeiras as mais importantes. Já as propriedades mecânicas incluem as resistências à compressão e à tração, o módulo de elasticidade e as relações de tensão-deformação dos materiais. No Brasil, o projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio é normatizado pelas normas NBR 14432 (ABNT,2001) e NBR 15200 (ABNT, 2012), as quais seguem as recomendações das normas europeias (EUROPEAN STANDARD, 2002; EUROPEAN STANDARD, 2004).

No geral, os modelos matemáticos que representam a variação dessas propriedades, em função da temperatura, são estabelecidos por meio de curvas médias com base em resultados experimentais ou modelagens matemáticas e são válidos para determinados tipos de agregados (COSTA, 2008). Assim, alterações no traço de concreto e no tipo de agregado graúdo implicam no desenvolvimento de novos modelos matemáticos.

O objetivo desse trabalho é determinar experimentalmente as resistências à compressão e a tração, bem como o módulo de elasticidade, de dois concretos de média resistência, um convencional e outro autoadensável, depois de submetidos a elevadas temperaturas, típicas de situação de incêndio, e comparar com as recomendações de códigos de projeto, tais como o Eurocode 2 (EUROPEAN STANDARD, 2004) e a norma brasileira NBR 15200 (ABNT,2012).

1.1 INCÊNDIO

Um modelo de incêndio real é muito difícil de ser tabulado, tendo em vista que em uma situação de incêndio real existem inúmeras variáveis que influenciam na situação. Então, para se criar um padrão, foi adotado um modelo simplificado de cálculo de curvas nominais que foi nomeado como modelo do incêndio padrão (SILVA, 2012). Curvas nominais são curvas genéricas, representadas por tabelas de aplicações diretas de resultados e equações simples, e é generalizada quanto ao compartimento e cenário que pode ocorrer o incêndio (COSTA, 2008).

Essa generalização torna as curvas de incêndio padrão não condizentes com a situação real, justamente pelo fato de que é generalizada e o incêndio real não é, pois depende de variadas situações. Além disso, elas representam a temperatura dos gases aplicados ao compartimento durante o incêndio em relação ao tempo, logo não é a temperatura interna do elemento estrutural propriamente dito. Porém, esse método facilita ensaios de elementos construtivos para avaliar a resistência ao fogo do material (COSTA; SILVA, 2006).

As curvas-padrão mais utilizadas internacionalmente são: a curva-padrão (*standard curve*) para incêndios de materiais celulósicos, a curva “H” (*hydrocarbon curve*) para incêndios de hidrocarbonetos e a curva de incêndio externo (*external fire curve*).

Enquanto as curvas de incêndio padrões são modelos simplificados de cálculo de situações de incêndio em estruturas, as curvas paramétricas englobam mais variáveis, tais como intensidade do fogo, carga de incêndio, inércia termal, materiais das vedações e ventilação do ambiente, tornando assim os resultados mais fidedignos da realidade de um incêndio real que as curvas de incêndio padrão.

As curvas paramétricas são diferentes em seus preceitos, caso o incêndio seja controlado pela ventilação ou pelo combustível. A curva paramétrica do Eurocode 1 (EUROPEAN STANDARD, 2002) é uma das mais utilizadas e considera que todo o material inflamável participa da reação de combustão. Ela usa como referência o modelo de incêndio natural que possui limitadores de ambientes com até 4 metros de altura, área de piso de até 500 m² e sem aberturas horizontais no teto e piso.

A título de exemplo, a curva parametrizada do Eurocode 1 (EUROPEAN STANDARD, 2002) foi aplicada a uma sala de aula com as seguintes dimensões: 7,65 m de comprimento, 5,65 m de largura, 3,6 m de pé direito. O compartimento possui quatro aberturas de ventilações nas paredes, sendo duas janelas de 3,25 m x 1,5 m e duas janelas de 3,25 m x 0,75 m, resultando num grau de ventilação de 0,085 m^{1/2}. Por se tratar de uma sala de aula, a carga de incêndio relacionada à área de piso do compartimento vale 285 MJ/m², o que resulta em uma carga de incêndio de projeto relacionada à área total do compartimento de 101,41 MJ/m² após aplicação dos coeficientes de ponderação que levam em conta os riscos e os mecanismos de combate ao incêndio da edificação (EUROPEAN STANDARD, 2002). Essa sala possui laje de concreto no teto e no piso e paredes de alvenaria em tijolo cerâmico revestidas com argamassa cimentícia de 2 cm de espessura. Daí, obtém-se que o incêndio nesse ambiente é controlado pelo combustível e a temperatura dos gases atinge um valor máximo de 527°C depois de 20 minutos. Na Figura 1 é mostrada a curva parametrizada obtida para esse ambiente, indicando os seus trechos ascendente e descendente.

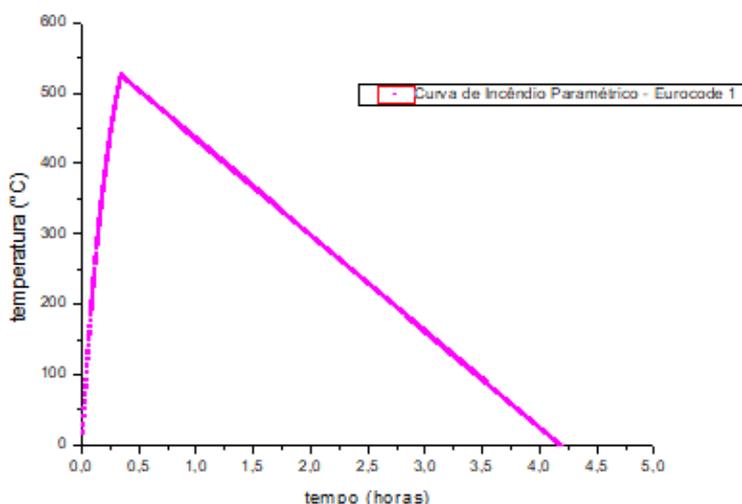


FIGURA 1: Curva de incêndio parametrizada para uma sala de aula.
FONTE: Eurocode 1 (EUROPEAN STANDARD, 2002)

1.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS

As propriedades do concreto em função da temperatura são estabelecidas por meio de modelos matemáticos obtidos de resultados experimentais ou modelagens matemáticas (COSTA, 2008). A resistência à compressão do concreto diminui com o aumento da temperatura e pode ser calculada por diversas expressões, entre as quais a Equação 1 (NIST, 2010).

$$f_{ck,\theta} = f_{ck}, \text{ para } \theta \leq 50^{\circ}\text{C} \quad \text{Eq. [1.a]}$$

$$f_{ck,\theta} = f_{ck} (1,28 - 0,0056 \theta), \text{ para } 50^{\circ}\text{C} < \theta \leq 100^{\circ}\text{C} \quad \text{Eq. [1.b]}$$

$$f_{ck,\theta} = 0,72 f_{ck}, \text{ para } 100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 350^{\circ}\text{C} \quad \text{Eq. [1.c]}$$

$$f_{ck,\theta} = f_{ck} (1,31 - 0,00168 \theta), \text{ para } 350^{\circ}\text{C} < \theta \leq 778^{\circ}\text{C} \quad \text{Eq. [1.d]}$$

$$f_{ck,\theta} = 0, \text{ para } \theta > 778^{\circ}\text{C} \quad \text{Eq. [1.e]}$$

Em que:

$f_{ck,\theta}$ = resistência à compressão do concreto a temperatura elevada θ (MPa);

f_{ck} = resistência à compressão do concreto a temperatura ambiente (MPa).

A resistência à tração do concreto é comumente desprezada em temperatura ambiente e em temperaturas elevadas. Porém, nos casos em que ela necessita de ser calculada, a Equação 2, sugerida pelo Eurocode 2 (EUROPEAN STANDARD, 2004) pode ser utilizada.

$$f_{ct,\theta} = f_{ct}, \text{ para } \theta \leq 100^{\circ}\text{C} \quad \text{Eq. [2.a]}$$

$$f_{ct,\theta} = [1 - (\theta - 100)/500] f_{ct}, \text{ para } 100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 600^{\circ}\text{C} \quad \text{Eq. [2.b]}$$

Em que:

$f_{ct,\theta}$ = resistência a tração do concreto à temperatura elevada θ (MPa);

f_{ct} = resistência a tração do concreto à temperatura ambiente (MPa);

O módulo de elasticidade do concreto (E_c) decresce com o aumento da temperatura assim como as outras propriedades citadas. Para análises simplificadas de cálculo, em que se admitem constantes o módulo de elasticidade e a rigidez do elemento, a Equação 3 pode ser aplicada, segundo o Eurocode 2 (EUROPEAN STANDARD, 2004).

$$E_{c,\theta} = k_{cE,\theta} E_c \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

$E_{c,\theta}$ = módulo de elasticidade do concreto à temperatura elevada θ (MPa);

$k_{cE,\theta}$ = coeficiente de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura θ (adimensional);

E_c = módulo de elasticidade do concreto à temperatura ambiente (MPa).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dois tipos de concreto utilizados no presente estudo foram fornecidos por centrais dosadoras. Os insumos e as respectivas quantidades utilizadas na produção dos dois concretos estão relacionados na Tabela 1. O traço A é de um concreto convencional com resistência característica à compressão estimada de 40 MPa, o qual apresentou durante a moldagem um abatimento de 14,0 cm determinado conforme a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998). Já o traço B é de um concreto autoadensável com resistência característica à compressão estimada de 45 MPa, o qual apresentou durante a moldagem um espalhamento de 64 cm determinado conforme a norma NBR 15823-2 (ABNT, 2017).

TABELA 1: Quantidade de materiais utilizados na produção dos concretos.

Material	Quantidade (Kg/m ³)	
	Traço A	Traço B
Cimento CP II F 40	386,0	485,3
Areia Natural	567,0	468,0
Areia Artificial	150,0	312,0
Brita nº 0	467,0	421,3
Brita nº 1	702,0	421,3
Água	193,0	222,7
Aditivo polifuncional	3,280	5,466
Relação A/C	0,50	0,46

FONTE: Autoria Própria.

Inicialmente, foi feita uma análise visual dos agregados graúdos utilizados na produção dos dois tipos de concreto (Figura 2). Dessa análise, constatou-se que se tratava de um agregado originário de uma rocha sedimentar metamórfica com a presença de quartzo em sua estrutura. Segundo informações do fornecedor do agregado graúdo para as centrais dosadoras, a rocha de onde foram extraídos os agregados era um Gnaisse, o qual é considerado um quartzofeldspático pertencente ao grupo dos silicatos.



FIGURA 2: Agregados selecionados para análise visual.

FONTE: Autoria Própria.

2.1 GRANULOMETRIA

Os agregados grão e miúdo utilizados na confecção dos traços foram caracterizados para determinação da sua composição granulométrica conforme especificado na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para execução do ensaio foram obtidas duas amostras para cada tipo de agregado, respeitando as quantidades mínimas de massa conforme preconizado em norma. Ambas foram acondicionadas na estufa por 24 h com temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Após o processo de secagem em estufa, foi determinada a massa em uma balança com precisão de 0,1g.

2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Os dois tipos de concreto foram caracterizados segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005) para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto no estado endurecido. Esses ensaios foram realizados nos corpos de prova sem aquecimento com o objetivo de obter informações sobre a distribuição interna dos poros nos dois tipos de concreto e, assim, identificar eventuais influências da diferença de trabalhabilidade dos concretos.

Para realização do ensaio foram tomados três corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada traço. Os mesmos foram colocados em estufa com temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por um período de 72 h, e, após resfriamento, determinada a massa seca (M_s) dos mesmos. Logo após, foram imersos em recipiente com água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 72 h. Completada a etapa de saturação, foi realizado o aquecimento da água do recipiente com as amostras até o estado de ebulição, durante o período de 5 h. A seguir, deixou-se a água resfriar, por perda natural de calor, para então ser aferida a massa saturada (M_{sat}) e a massa imersa em água (M_i), com o uso de balança hidrostática, dos mesmos.

De acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005), o valor da absorção é definido pela Equação 4:

$$A (\%) = (M_{\text{sat}} - M_s) / M_s \cdot 100 \quad \text{Eq. [4]}$$

Em que:

M_s : massa do corpo de prova seco em estufa;

M_{sat} : massa do corpo de prova saturado.

O índice de vazios é definido pela Equação 5:

$$I_v (\%) = (M_{\text{sat}} - M_s) / (M_{\text{sat}} - M_i) \cdot 100 \quad \text{Eq. [5]}$$

Em que:

M_i : massa do corpo de prova saturado, imerso em água.

A massa específica da amostra seca é definida pela Equação 6:

$$\rho_s = M_s / (M_{\text{sat}} - M_i) \quad \text{Eq. [6]}$$

2.3 AQUECIMENTO DO CONCRETO A ALTAS TEMPERATURAS

Os dois traços de concreto foram aquecidos a três temperaturas, isto é, 200°C, 400°C e 600°C, de modo a identificar a influência da temperatura nas propriedades mecânicas dos concretos. A temperatura máxima de 600°C foi adotada por ser próxima da temperatura máxima dos gases estimada em um incêndio real em uma sala de aula, conforme mostrado no item 1.1.

Para o aquecimento foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm e três corpos de prova cilíndricos de 15 cm x 30 cm para cada uma das temperaturas de ensaio, além dos corpos de prova de controle para serem ensaiados à temperatura ambiente (25°C). Os corpos de prova foram moldados conforme especificado na norma NBR 5739 (ABNT, 2018), como mostrado na Figura 3, e depois de desmoldados foram mantidos em câmara úmida por 28 dias. Depois desse período, eles foram retirados da câmara úmida e colocados em um compartimento a temperatura ambiente durante 15 dias para completa secagem. Por fim, antes de submeter os corpos de prova ao aquecimento, eles tiveram as extremidades retificadas a fim de conferir planeza e paralelismo nas faces do mesmo.



FIGURA 3: Concretagem dos corpos de prova do Traço A.

FONTE: Autoria Própria.

O aquecimento dos corpos de prova foi realizado em uma mufla automatizada com temperatura máxima de aquecimento de 1340°C. Foram aquecidos três corpos de prova de cada vez, sendo a temperatura registrada em intervalos de 2 minutos, até 20 minutos, e após 20 minutos foram registradas a cada 5 minutos até se chegar à temperatura final desejada. Posteriormente ao aquecimento, a mufla foi desligada e os corpos de prova foram mantidos na mesma, sob resfriamento ao ar livre, até a temperatura interna da mufla voltar a temperatura ambiente, momento em que os corpos de prova foram retirados para ensaio. Na Figura 4 é mostrada a curva de aquecimento da mufla utilizada nesse estudo, a qual é comparada com as curvas de incêndio padrão e a curva de incêndio parametrizada detalhada no item 1.2. Nota-se que a curva de aquecimento do ensaio desse estudo possui um menor gradiente de aquecimento, principalmente se comparada às curvas de incêndio padrão. Contudo, ela possui um gradiente próximo a dos ensaios realizados por Husem (2006) para concretos de resistência semelhante a desse estudo.

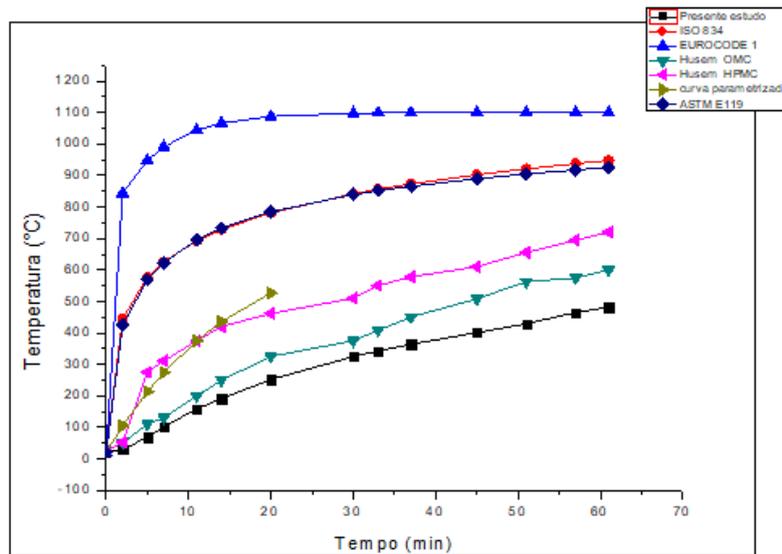


FIGURA 4: Curvas de aquecimento do concreto.

FONTE: Autoria Própria.

2.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Para a determinação da resistência à compressão, foram utilizados três corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, os quais foram ensaiados conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2018) utilizando uma prensa hidráulica classe I com capacidade máxima de 2000 KN, sob uma velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s (Figura 5).

Como capeamento dos corpos de prova, utilizou-se discos de neoprene confinados em pratos metálicos segundo recomendação da ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2015) para concretos com resistências entre 10,0 MPa e 85,0 MPa.



FIGURA 5: Ensaio de resistência à compressão axial do concreto.

FONTE: Autoria Própria.

2.5 TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para realização dos ensaios de tração por compressão diametral, foram utilizados três corpos de prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, os quais foram ensaiados conforme a norma NBR 7222 (ABNT, 2015) e executados em prensa hidráulica classe I com capacidade máxima de 2000 KN (Figura 6).



FIGURA 6: Ensaio de tração por compressão diametral do concreto.

FONTE: Autoria Própria.

2.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

O método abordado no presente estudo determina o Módulo de Deformação Inicial do concreto (E_{ci}) a partir da inclinação da reta secante da curva tensão-deformação depois de sucessivos ciclos de carregamento e descarregamento. Foi utilizado o método descrito na norma NBR 8522 (ABNT, 2017) que determina o módulo de elasticidade a 30% da resistência à compressão do concreto. Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, os quais foram ensaiados em uma prensa hidráulica classe I com capacidade máxima de 2000 KN, sob uma velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s. Para aferição das deformações durante o ensaio, utilizou-se de três extensômetros mecânicos com resolução de 0,001mm fixados externamente (Figura 7).



FIGURA 7: Ensaio de módulo de elasticidade com extensômetros mecânicos.

FONTE: Autoria Própria.

O método da NBR 8522 (ABNT, 2017) admite que o concreto apresente comportamento elástico e linear até 30% da sua resistência à compressão, o que vale para os concretos sem aquecimento. Contudo, notou-se durante os ensaios que os corpos de prova aquecidos a temperaturas maiores que 400°C apresentavam um comportamento não linear desde o início do carregamento, seguido de um aumento de rigidez com o aumento do carregamento (Figura 8). Assim, o método de ensaio para os corpos de prova aquecidos a 400°C ou mais foi modificado, adotando a utilização de extensômetros elétricos de resistência colados ao concreto. Isso se deu porque a fixação dos extensômetros mecânicos não era possível durante todo o ensaio, pois alguns corpos de prova alcançaram a ruína mesmo com uma força aplicada igual a 30% da resistência à compressão do concreto após submetido ao aquecimento.

Os extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*) utilizados possuíam comprimento de 85 mm, valor inferior ao do extensômetro mecânico. Para efeito de comparação com os resultados obtidos do ensaio dos corpos de prova com os extensômetros mecânicos, os corpos de prova aquecidos a 400°C ou mais foram carregados até 10% da sua resistência com o extensômetro mecânico acoplado. Depois foram novamente ensaiados até 30% da resistência à compressão do concreto aquecido, sendo a deformação dos extensômetros elétricos de resistência corrigida pelo ensaio anterior com o extensômetro mecânico.

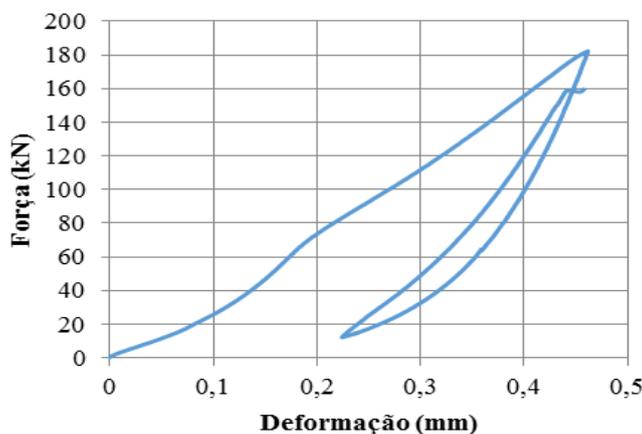


FIGURA 8: Comportamento não linear do ensaio de módulo de elasticidade em concretos após o aquecimento.

FONTE: Autoria Própria.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 GRANULOMETRIA

Os resultados do ensaio de granulometria dos agregados utilizados nos traços A e B são mostrados na Tabela 2 e na Figura 9. Observa-se que em ambos os traços os agregados graúdos e miúdos possuem propriedades geométricas semelhantes. Contudo, através da Tabela 1 conclui-se que o traço A possui maior quantidade em massa de agregado graúdo em relação ao traço B (1169 kg/m³ contra 842,6 kg/m³), logo o traço B, autoadensável, possui maior quantidade de finos e um maior consumo de cimento que o traço A.

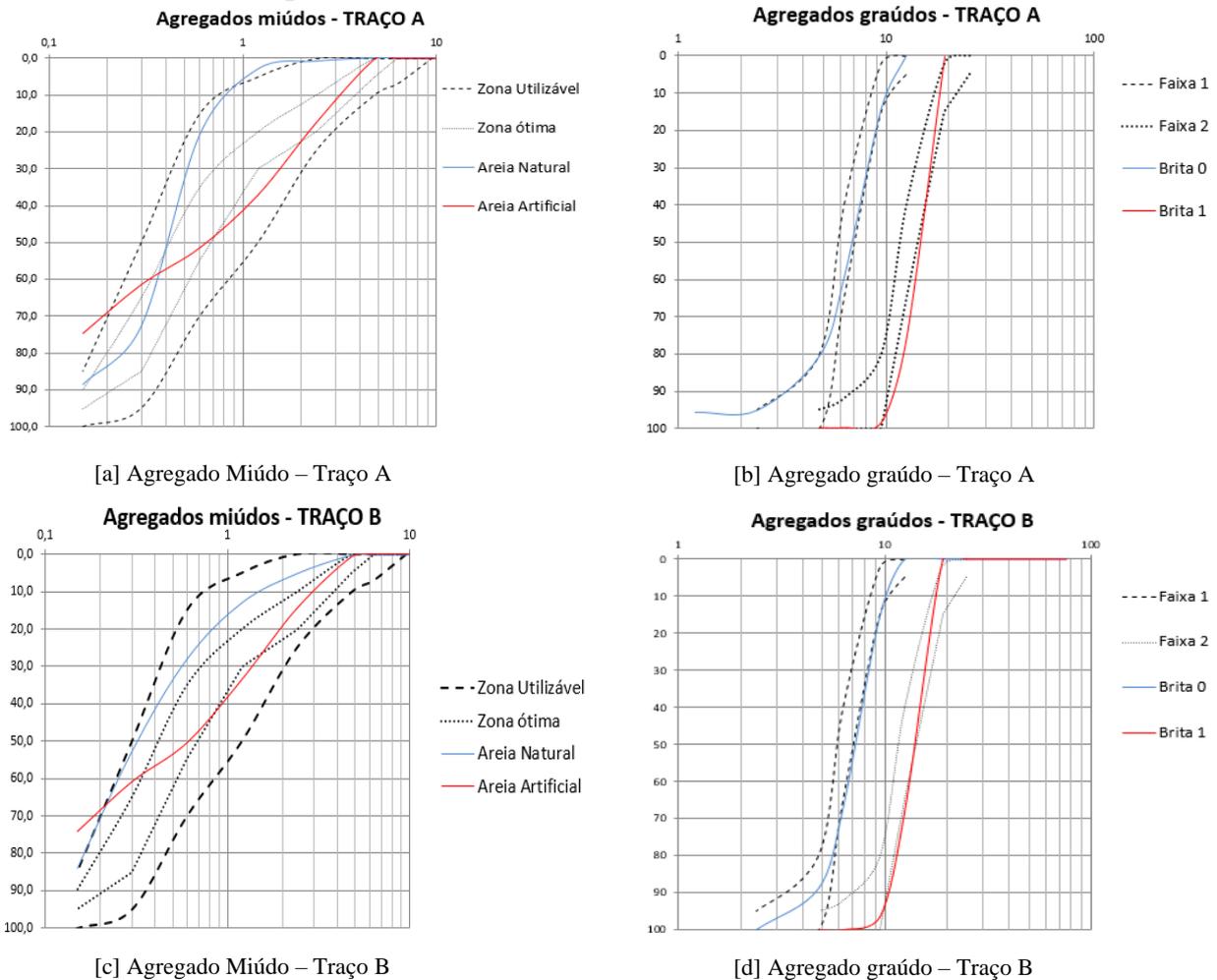


FIGURA 9: Resultados do ensaio de granulometria para os agregados.
FONTE: Autoria Própria.

TABELA 2: Resultados do ensaio de granulometria para os agregados.			
TRAÇO	Material	Dimensão máxima característica	Módulo de Finura
A	Areia artificial	4,8 mm	2,43
	Areia natural	1,2 mm	1,86
	Brita 0	12,5 mm	5,72
	Brita 1	19 mm	6,98
B	Areia artificial	4,8 mm	2,35
	Areia natural	4,8 mm	1,82
	Brita 0	12,5 mm	6,04
	Brita 1	19 mm	6,96

FONTE: Autoria Própria.

3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Na Tabela 3 são mostrados os resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica dos dois traços de concreto estudados. Desses resultados, pode-se concluir que ambos os concretos possuem características semelhantes, em especial o índice de vazios, apesar das diferentes trabalhabilidades. A maior diferença está na menor massa específica do Traço B, autoadensável, devido ao menor volume de agregados graúdos. Além disso, o traço B apresentou maior variabilidade nas suas propriedades.

TABELA 3: Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto.

Traço	Medida	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (tf/m ³)
A	\bar{x}	4,35	10,78	2,48
	σ	0,199	0,471	0,015
	σ^2	0,039	0,222	0,000
B	\bar{x}	4,37	10,46	2,41
	σ	0,849	1,596	0,097
	σ^2	0,720	2,549	0,009

Legenda: \bar{x} : valor médio; σ : desvio padrão; σ^2 : variância.

FONTE: Autoria Própria.

3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Na Tabela 4 são mostrados os valores obtidos para a resistência à compressão dos corpos de prova de cada traço estudado. Já na Figura 10 é mostrada a perda de resistência do concreto em função do aumento da temperatura de aquecimento.

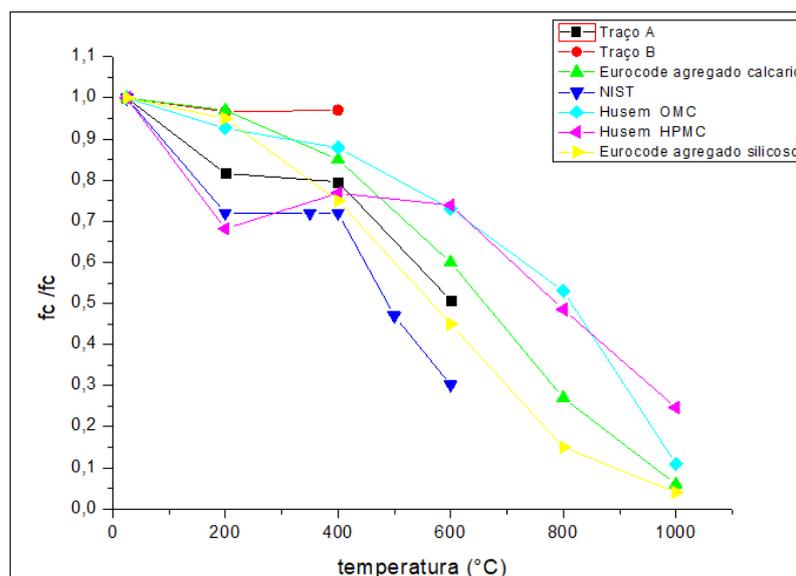
TABELA 4: Resultados de resistência à compressão do concreto.

Temperatura	Traço A			Traço B		
	\bar{x}	σ	σ^2	\bar{x}	σ	σ^2
Ambiente (25°C)	68,08	3,300	10,870	60,99	5,268	27,754
200°C	55,58	2,842	8,078	58,95	2,065	4,264
400°C	54,19	2,997	8,985	59,17	4,004	16,034
600°C	34,58	4,418	19,517	-	-	-

Legenda: \bar{x} : valor médio; σ : desvio padrão; σ^2 : variância.

FONTE: Autoria Própria.

Para o traço B, autoadensável, não foi determinada a resistência à compressão axial dos corpos de prova submetidos à temperatura de 600°C, pois à 400°C os corpos de prova destinados à realização dos ensaios de módulo de elasticidade desse traço explodiram dentro da mufla durante o aquecimento, e, portanto, a execução dos aquecimentos foi interrompida.

**FIGURA 10:** Resistência à compressão axial dos concretos em função da temperatura.

FONTE: Autoria Própria.

Observa-se que, aparentemente, o traço A possui maior resistência à compressão que o traço B à temperatura ambiente. Contudo, a análise de variância com um nível de significância de 5% mostra que esses dois traços, na verdade, possuem resistência à compressão semelhante quando à temperatura ambiente.

Depois de aquecidos, esses dois traços apresentam comportamento distintos. O Traço A, de concreto convencional, apresenta nítida redução da resistência à compressão com o aumento da temperatura. De forma geral, a redução segue a tendência recomendada pelo Eurocode 2 (EUROPEAN STANDARD, 2004), situando-se mais próximo da curva para concretos com agregados graúdos silicosos. A maior diferença está na temperatura de 200°C, no qual o experimento mostrou uma redução de resistência maior que o previsto no Eurocode 2 (EUROPEAN STANDARD, 2004). Essa redução acentuada também foi observada no ensaio de Husem (2006) para concretos de alta resistência (HPMC) que possuíam resistência à compressão média de 67,84 MPa. Contudo, a perda de resistência observada por esse autor foi menor que a observada neste trabalho para temperaturas acima de 200°C. A curva que parece melhor representar a perda de resistência do concreto do traço A é a proposta apresentada pelo NIST (2010), que também apresenta uma perda acentuada de resistência até 200°C, mantém-se constante até 400°C e volta a apresentar perda de resistência até 600°C. Contudo, os percentuais de perda são maiores que os valores médios observados nos ensaios deste trabalho.

Já o Traço B, de concreto autoadensável, não mostrou diminuição da resistência à compressão até 400°C, estando a resistência à temperatura de 200°C no mesmo grupo da resistência à temperatura ambiente segundo a análise de variância com um nível de significância de 5%. Isso talvez explique a ruptura explosiva dos corpos de prova de 15 cm x 30 cm quando aquecidos a 400°C. Devido à maior quantidade de argamassa no traço B e ao menor teor de agregados graúdos, a matriz desse traço deve apresentar poros internos de menor tamanho, o que dificulta a saída de água durante o aquecimento, favorecendo o efeito de pressão interna da água que resultou na ruptura explosiva dos corpos de prova com concreto autoadensável. Esse fenômeno ocorre nas camadas mais internas do concreto, tendo em vista que ambos apresentaram a mesma absorção e o mesmo índice de vazios.

É interessante notar que os resultados de Husem (2006) indicaram uma maior perda de resistência com o aquecimento à medida que se aumenta a resistência à compressão do concreto, ou seja, o concreto de resistência normal (OMC, com resistência à compressão média de 52,5 MPa) apresentou menor perda de resistência que o concreto HPMC. Já o concreto autoadensável não apresentou perda significativa de resistência até temperaturas de 400°C, apesar de possuir resistência à temperatura ambiente da mesma ordem de grandeza do concreto HPMC usado por Husem (2006).

3.4 TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na Tabela 5 são mostrados os valores obtidos do ensaio de tração por compressão diametral dos corpos de prova de cada traço estudado. Já na Figura 11 é mostrada a influência da temperatura de aquecimento na resistência à tração do concreto. Neste ensaio, limitou-se a temperatura em 400°C. O Traço B não pôde ser caracterizado para a temperatura de 400°C devido à explosão dos corpos de prova durante o aquecimento.

TABELA 5: Resultados de resistência à tração do concreto.

Temperatura	Traço A			Traço B		
	\bar{x}	σ	σ^2	\bar{x}	σ	σ^2
Ambiente (25°C)	5,07	0,197	0,039	5,05	0,106	0,011
200°C	4,40	0,111	0,012	4,54	0,186	0,035
400°C	4,71	0,262	0,069	-	-	-

Legenda: \bar{x} : valor médio; σ : desvio padrão; σ^2 : variância.

FONTE: Autoria Própria.

A partir da Figura 11, é possível concluir que os corpos de prova do traço A após o aquecimento perderam resistência a tração no intervalo entre a temperatura ambiente e 200°C e que entre 200°C e 400°C houve um pequeno aumento da resistência. Por outro lado, após o aquecimento, os corpos de prova no traço B perderam resistência a tração no intervalo entre a temperatura ambiente e 200°C. Diferentemente da resistência à compressão, neste caso a perda de resistência à tração com o aumento da temperatura foi semelhante para os dois traços de concreto, mostrando que neste caso não houve influência do teor de agregados graúdos nem da consistência do concreto. Comparando com os resultados obtidos por Husem (2006), observa-se uma maior redução da resistência à tração obtida por esse pesquisador, a qual diminui constantemente com a temperatura. No concreto de alta resistência a redução é mais acentuada entre 25°C e 200°C, depois se mantém constante e volta a reduzir entre 400°C e 600°C. Vale ressaltar que a resistência à tração medida por esse pesquisador foi a resistência à tração na flexão, enquanto neste estudo foi determinada a resistência à tração por compressão diametral.

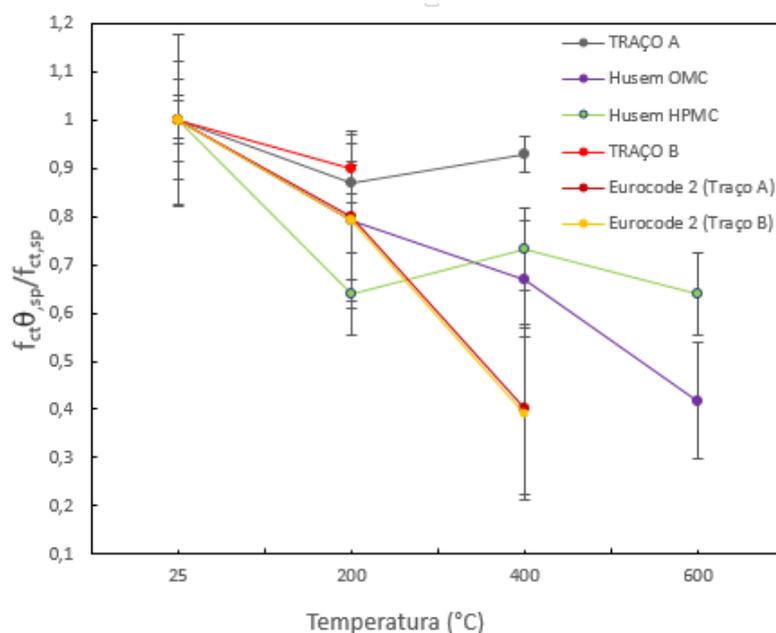


FIGURA 11: Resistência à tração dos concretos em função da temperatura.

FONTE: Autoria Própria.

3.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Na Tabela 6 são mostrados os valores obtidos do ensaio de módulo de elasticidade dos corpos de prova de cada traço estudado. Já na Figura 12 é mostrada a redução do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura de aquecimento.

TABELA 6: Resultados de módulo de elasticidade estático do concreto.

Temperatura	Traço A			Traço B		
	\bar{x}	σ	σ^2	\bar{x}	σ	σ^2
Ambiente (25°C)	14,23	1,971	3,885	37,61	1,310	1,717
200°C	36,03	1,798	3,232	28,98	1,097	1,203
400°C	29,21	1,482	2,196	-	-	-
600°C	*8,46	*0,856	*0,732	-	-	-

Legenda: \bar{x} : valor médio; σ : desvio padrão; σ^2 : variância; * utilização de strain gages nas determinações.

FONTE: Autoria Própria.

Para o Traço B não foi possível a realização do ensaio de módulo de elasticidade estático dos corpos de prova submetidos à 400°C e 600°C, pois à 400°C, durante o aquecimento no forno mufla, os corpos de prova explodiram, e, portanto, a execução dos aquecimentos foi interrompida.

Observa-se da Figura 12 que o Traço A possui uma curva de diminuição do módulo de elasticidade semelhante à curva do Eurocode 2 (EUROPEAN STANDARD, 2004), para concretos com agregados silicosos, inclusive para a temperatura 600°C. Isso mostra a eficiência da metodologia proposta para avaliar o módulo de elasticidade de concretos submetidos a alta temperatura, mesmo com a significativa não linearidade da curva tensão-deformação do concreto para baixos níveis de tensão.

Já o Traço B possui uma maior perda no valor do módulo de elasticidade quando aquecido a 200°C, isto é, apresenta uma redução média de 23% enquanto o traço A apresenta uma redução média de 13%. Isso, provavelmente, deve-se ao menor teor de agregado graúdo no Traço B, autoadensável, com maior teor de material cimentício. De fato, o menor teor de agregados graúdos no Traço B também influenciou o módulo de elasticidade à temperatura ambiente, o qual foi 12% menor que o módulo de elasticidade do Traço A, mesmo ambos os traços possuindo o mesmo tipo de agregado graúdo.

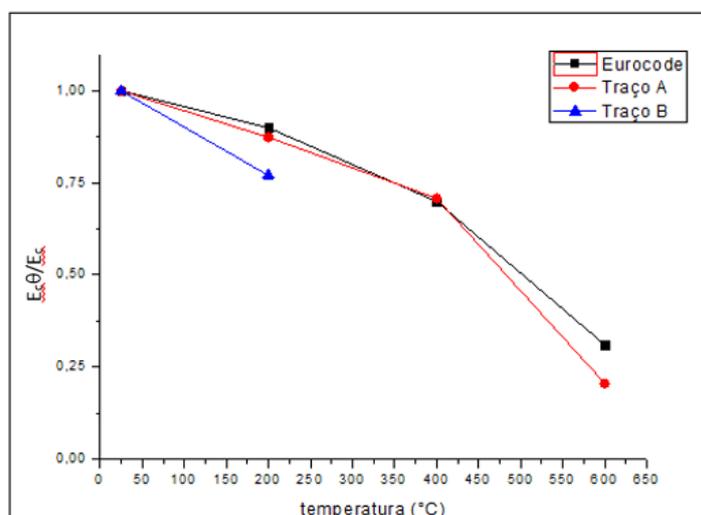


FIGURA 12: Módulo de elasticidade dos concretos em função da temperatura.

FONTE: Autoria Própria.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo do comportamento de dois traços de concreto, um convencional e outro autoadensável, de resistência à compressão semelhante e confeccionados com o mesmo tipo de agregado graúdo (um gnaisse), quando submetidos a altas temperaturas simulando um incêndio real em uma sala de aula.

O concreto autoadensável, em função de sua maior trabalhabilidade, apresentou um menor teor de agregados graúdos e um maior consumo de aditivo superplastificante quando comparado ao concreto convencional. Isso afetou o seu módulo de elasticidade à temperatura ambiente, que foi 12% menor que a do concreto convencional. Ainda, a sua massa específica foi 2,82% menor que a do concreto convencional. Já a absorção e o índice de vazios foram semelhantes para os dois concretos.

A maior influência do teor de agregados e do consumo de aditivo superplastificante foi observada na resistência à compressão. Enquanto o concreto convencional apresentou uma redução da resistência com o aumento da temperatura, o concreto autoadensável não apresentou redução de sua resistência à compressão até uma temperatura de 400°C. Contudo, a essa temperatura houve a explosão dos corpos de

prova cilíndricos de 15 cm x 30 cm, o que mostra uma acentuada redução da resistência do concreto acima dessa temperatura quando comparado ao concreto convencional. Isso provavelmente deve-se ao maior teor de finos no concreto autoadensável, indicando um comportamento diferenciado do previsto na norma NBR 15200 (ABNT, 2012) com uma ruína brusca do concreto autoadensável a temperaturas de apenas 400°C. Esse nível de temperatura pode ser atingido em situações reais de incêndio em apenas 20 minutos, segundo a curva de incêndio parametrizada para uma sala de aula. Com isso, os pilares de uma estrutura de concreto armado confeccionado com concreto autoadensável quando em situação de incêndio podem apresentar uma maior redução de resistência com a elevação de temperatura que o previsto em modelos analíticos, como o método das isotermas de 500°C sugerido pelo Eurocode 2 (EUROPEAN STANDARD, 2004). Em última instância, esse tipo de elemento estrutural com concreto autoadensável pode colapsar em um tempo inferior ao Tempo Requerido de Resistência ao Fogo previsto em projeto.

A influência do teor de agregados também foi observada no módulo de elasticidade, determinado conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017) também para os concretos submetidos a aquecimento. Neste caso, o concreto autoadensável apresentou uma maior redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura até 200°C.

A resistência à tração do concreto também foi influenciada pelo aumento da temperatura, contudo neste caso não foi observada a influência do teor de agregados graúdos.

O concreto convencional analisado neste trabalho apresentou uma redução da resistência à compressão para a temperatura de 200°C maior que o previsto no Eurocode 2 (EUROPEAN STANDARD, 2004) para concretos com agregados silicosos. Já para temperaturas mais altas, a redução observada no ensaio foi semelhante ao previsto no Eurocode 2 (EUROPEAN STANDARD, 2004). Isso sugere estudos mais aprofundados de modo a confirmar a validade da expressão sugerida na NBR 15200 (ABNT, 2012), baseado no Eurocode 2 (EUROPEAN STANDARD, 2004), para concretos com resistência um pouco mais elevada que, contudo, têm sido empregados frequentemente em obras de concreto moldado no local e pré-fabricado. A curva recomendada pelo NIST (2010) mostrou-se mais adequada para representar o comportamento do concreto de média resistência aqui estudo, captando bem a elevada redução da resistência à compressão para pequenos aumentos de temperatura, também observado em outros ensaios da literatura.

Os resultados obtidos neste trabalho não podem ser interpretados de forma genérica, haja visto que o estudo foi realizado para um exemplo de aplicação específico e com parâmetros pré-definidos para os concretos estudados. Novos estudos devem ser realizados para permitir a extrapolação das conclusões para outros traços de concreto.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas REALMIX e MOLD Estruturas pela receptividade ao projeto, não só fornecendo o concreto para o estudo, mas também disponibilizando equipamentos e um profissional para auxiliar e fornecer os dados necessários para o estudo. Agradecem, também, ao professor Carlos Alberto Lauro Vargas que auxiliou na identificação e caracterização mineralógica dos agregados graúdos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM C1231 / C1231M-15**: Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 14432: **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações**, Rio de Janeiro, 2001.

_____, NBR 15200: **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**, Rio de Janeiro, 2012.

_____, NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2018.

_____, NBR 7222: **Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2015.

_____, NBR 8522: **Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**, Rio de Janeiro, 2017.

_____, NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**, Rio de Janeiro, 2005.

_____, NBR NM 248: **Agregado – Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro, 2003.

_____, NBR NM 67: **Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**, Rio de Janeiro, 1998.

_____, NBR 15823-2: **Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams**, Rio de Janeiro, 2017.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**, São Paulo, 724f, Tese (Doutorado em engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

COSTA, C. N., SILVA, V. P. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio, *In: Seminário Internacional Natau 2006 – Inovações Tecnológicas E Sustentabilidade*, 2006, São Paulo, NATAU 2006, São Paulo: NATAU/FAUUSUP, 2006, 1 CD-ROM.

EUROPEAN STANDARD, EN 1991-1-2: **Eurocode 1: Actions on structures – part 1.2: General rules – Actions on structures exposed to fire**, Brussels: CEN, 2002.

EUROPEAN STANDARD, EN 1992-1-2: **Eurocode 2: design of concrete structures – part 1.2: General rules – structural fire design**, Brussels: CEN, 2004.

HUSEM, M. The effects of high temperature on compressive and flexural strength of ordinary and high performance concrete, *Fire Safety Journal*, v. 41, pp. 155–163, 2006 (doi:10.1016/j.firesaf.2005.12.002).

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, NIST Technical Note 1681 – **BestPractice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings**, Gaithersburg, 2010.

SILVA, V. P., **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012**, Ed. Blucher, 2012.