



**CENTRO UNIVERSITÁRIO PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS
UNIPAC BARBACENA
ENGENHARIA CIVIL**

**LISA LOHANA COSTA CAMPOS
NAYARA DE PAULA VIEIRA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA RESIDUAL DO CONCRETO COM AGREGADOS DA
REGIÃO DE BARBACENA-MG APÓS EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS
E RESFRIAMENTO LENTO**

**BARBACENA/MG
2022**

**LISA LOHANA COSTA CAMPOS
NAYARA DE PAULA VIEIRA**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA RESIDUAL DO CONCRETO COM AGREGADOS DA
REGIÃO DE BARBACENA-MG APÓS EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS
E RESFRIAMENTO LENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Presidente Antônio Carlos – FUPAC, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: MSc Tairine Cristine Bertola Cruz.

**BARBACENA/MG
2022**

CAMPOS, Lisa Lohana Costa; VIEIRA, Nayara de Paula. **Análise da resistência residual do concreto com agregados da região de Barbacena-MG após exposição a altas temperaturas e resfriamento lento.** Barbacena: 2022. 21 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Centro Universitário Presidente Antônio Carlos.

Resumo: O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil brasileira e, frente a incêndios, apresenta um bom desempenho, por mérito de suas características de incombustibilidade e baixa condutividade térmica. Porém, trata-se de um material de comportamento desuniforme, devido a sua composição heterogênea, tornando-se necessário conhecer e analisar a estrutura do concreto, a fim de dimensionar elementos que resistam a possíveis sinistros. O presente trabalho tem o objetivo de analisar a resistência residual do concreto traçado a mão, representando o concreto manufaturado nos canteiros de obras, após ser exposto a altas temperaturas. Para isso, moldaram-se corpos de provas que, posteriormente, foram submetidos a altas temperaturas, durante 30 minutos e resfriados de forma lenta. A dosagem foi realizada em acordo com a NBR12655. Obteve-se um traço de 1 : 1,788 : 2,815 : 0,564 (cimento : areia : brita : água) e resistência de 25 Mpa. Foram moldados 21 corpos de prova, que foram separados em 3 amostras. A primeira foi exposta a uma temperatura de 400°C, a segunda a 800°C e a terceira permaneceu em temperatura ambiente. O ensaio de compressão foi realizado com idade de 28 dias. O concreto apresentou resistência residual de 50,23% e 47,62% para as temperaturas de 400°C e 800°C, respectivamente. Vale salientar que o resultado do ensaio comprova a dessemelhança na reação do concreto exposto a elevadas temperaturas.

Palavras-chave: Concreto. Incêndio. Resistência residual. Resfriamento lento.

Abstract: Concrete is a material widely used in Brazilian civil construction. It performs well against fires due to its characteristics of incombustibility and low thermal conductivity. However, it is a material of uneven behavior due to its heterogeneous composition. This makes it necessary to know and analyze the structure of concrete in order to design elements that can withstand possible accidents. This paper aims to analyze the residual strength of hand-drawn concrete, representing the concrete manufactured on construction sites, after being exposed to high temperatures. For this, specimens were molded and later submitted to high temperatures for 30 minutes. The dosage was performed according to the NBR12655 standard. A mix of 1 : 1.788 : 2.815 : 0.564 (cement : sand : gravel : water) and a strength of 25 MPa was obtained. Twenty-one specimens were molded and separated into three samples. The first was exposed to a temperature of 400°C, the second to 800°C and the third remained at room temperature. The compression test was performed at an age of 28 days. The concrete showed a residual strength of 50.23% and 47.62% for the temperatures of 400°C and 800°C, respectively. It is worth noting that the test results prove the dissimilarity in the reaction of concrete exposed to high temperatures.

Keywords: Concrete. Fire. Residual resistance. Slow cooling.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material artificial constituído por diferentes componentes e, em função desta variabilidade, quando exposto a elevadas temperaturas, não apresenta um comportamento rigorosamente padronizado (MORALES, CAMPOS E FAGARELLO, 2011).

De acordo com Vespasiano (2016), a exposição a excessivos aumentos de calor pode afetar o sistema estrutural de uma edificação em concreto. Dentre as principais alterações apontadas pela literatura tem-se: a perda de resistência mecânica dos elementos, alterações na coloração, lascamentos e fissurações.

Dependendo do tempo de exposição, modo de resfriamento (lento ou brusco) e temperatura máxima atingida, as alterações nas propriedades características do concreto podem provocar danos estruturais ou, até mesmo, a ruptura brusca do sistema (VESPASIANO, 2016).

Os fatos apresentados tornam a temática bastante relevante para estudo, tendo em vista, também, o uso significativo desse elemento que, segundo César (2021), pode ser considerado como o mais utilizado na construção civil no Brasil.

Nesse sentido, partindo-se do princípio de que as ocorrências de incêndios são consideravelmente frequentes nas edificações, com uma média de 48 incidências anuais, conforme mostram dados do Corpo de Bombeiros de Barbacena-MG, este trabalho teve como objetivo analisar a perda residual de resistência à compressão do concreto manufaturado no canteiro de obras, fabricado com agregados obtidos na região, após exposição ao aumento de temperatura considerando um modo de resfriamento lento.

A pesquisa experimental, com cunho descritivo, foi realizada em laboratório, onde houve a simulação de sinistros, através do equipamento mufla, em 10 corpos de prova de concreto produzido manualmente com traço para obtenção de uma resistência característica de 25 MPa.

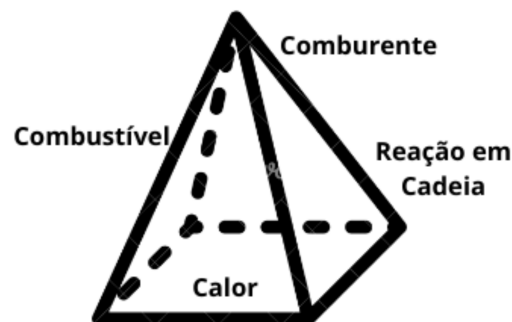
Inicialmente, apresenta-se uma revisão bibliográfica que aborda sobre o risco de incêndio em edificações e, em seguida, o comportamento do concreto exposto a altas temperaturas, onde foi realizada uma revisão sistemática de literatura, a qual foi fundamental para a posterior análise dos dados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O risco de incêndio em edificações

A NBR 13860 define fogo como “processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz” (ABNT, 1997). Na teoria conhecida como Tetraedro do Fogo (FIG. 01), cada face representa um elemento, que deve coexistir para que ocorra a combustão, sendo estes: o combustível (elemento suscetível à queima), o comburente (oxigênio), o calor e a reação em cadeia, ou seja, a interação entre os três primeiros (SEITO et al., 2008).

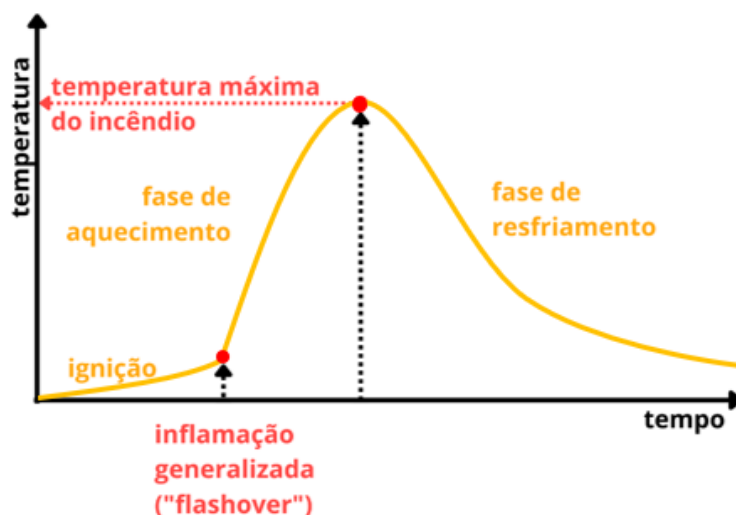
Figura 01 – Tetraedro do Fogo



Fonte: Seito (2008).

De forma genérica, um sinistro inicia-se com baixa intensidade e seu desenvolvimento irá depender do meio em que se instala (SOUSA E SILVA, 2015). Conforme a FIG. 02, o incêndio possui três estágios:

Figura 02 – Estágios de um incêndio



Fonte: Costa e Silva (2003).

- Ignição (*pré-flashover*): ocorre o início da inflamação, com crescimento gradual da temperatura. Termina no instante em que há a inflamação generalizada, também conhecida por “*flashover*”.
- *Flashover* (aquecimento): há a combustão de todo material combustível no compartimento e, conseqüentemente, o rápido crescimento da temperatura dos gases até alcançar o pico da curva.
 - Resfriamento: posteriormente à extinção do material combustível presente no compartimento, há uma diminuição lenta na temperatura dos gases (BRITZ; CARVALHO E HELENE, 2020; COSTA E SILVA, 2002; COSTA E SILVA, 2003).

Os sinistros têm as mais diversas causas, dentre elas falhas na parte elétrica, descuidos com velas ou fogão, origem criminosa e, até mesmo, incêndios em matas próximas às residências. Diversos são os fatores que influenciam o início e a propagação do fogo, portanto, cada incêndio se comporta de maneira única. Além disso, fatores como dimensões do local, quantidade e distribuição dos materiais combustíveis, ventilação e medidas de prevenção e proteção contra incêndio são elementos preponderantes no comportamento do sinistro (SEITO et al., 2008).

No Brasil, até o início da década de 70, o risco de incêndio em edificações, era tratado como responsabilidade maior do Corpo de Bombeiros. Entretanto, a ocorrência de dois grandes sinistros em São Paulo (SP), nos edifícios Andraus (1972) e Joelma (1974), fomentou o início da obrigatoriedade de medidas de segurança contra incêndios no projeto e execução de edificações. No mesmo ano de 1974, houve a publicação da NB 208¹, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, que tratou sobre saídas de emergência em edifícios (SEITO et al., 2008).

Em 1983, através de um decreto-lei estadual, foi instituído em São Paulo o Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros - AVCB, documento que comprova a estabilidade e segurança dos edifícios residenciais multifamiliares e comerciais, em casos de incêndio, obtido após projeto e vistoria realizada pelo Corpo de Bombeiros. Por meio de normas denominada Instruções Técnicas, são estabelecidos os critérios para a obrigatoriedade da vistoria e do projeto. Atualmente, outros estados também exigem tal documento, como por exemplo Minas Gerais (AVCB, s.d).

¹ Norma cancelada, substituída pela NBR 9077 – Saída de emergência em edifícios, publicada em 1985 (ABNT, 1993).

Quase 30 anos depois, em 30 de março de 2017, foi sancionada a Lei Federal N°13.425, que “estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público” (BRASIL, 2017), também decorrência de um grande incêndio, que ocorreu na Boate Kiss, em Santa Maria (RS), no ano de 2013 (PORTAL PREVINSA, s.d).

De acordo com o Corpo de Bombeiros Militar de Barbacena (MG), entre 2016 e 2021, foram registradas 286 ocorrências em edificações na região², ou seja, uma média anual de, aproximadamente, 48 incêndios. Abaixo, são exemplificados alguns destes registros, cujo recorte priorizou as edificações em concreto armado:

- Edifício Afonso Dani, em Barbacena (MG): o incêndio ocorreu em março de 2020 e teve origem criminosa. O fogo se espalhou por todos os andares da edificação que não possuía o AVCB, e resultou na morte de 02 pessoas. Após a perícia, foi constatado que não houve a condenação da estrutura, contudo, surgiram diversas trincas e fissuras na mesma (BARBACENA ONLINE, 2020).
- Residência no bairro Grogotó, em Barbacena (MG): em junho de 2019, uma casa foi atingida por um incêndio, também com origem criminosa. Após o ocorrido, tanto a edificação, quanto uma residência vizinha foram isoladas devido ao risco de desabamento e comprometimento da estrutura (G1, 2019).
- Residência em Carandaí (MG): em agosto de 2018, uma mãe e seus dois filhos vieram a óbito, depois que a casa em que viviam foi tomada pelo fogo. Um cômodo, na parte de trás da residência, desabou (G1, 2018).
- Residência em Alto Rio Doce (MG): o incêndio ocorreu em junho de 2018 e foi ocasionado pelo descuido de uma vela acesa. O fogo atingiu o primeiro andar do imóvel de dois pavimentos, causando trincas e fissuras na estrutura. Ninguém se feriu e o prejuízo foi apenas material (FOCO NA NOTÍCIA, 2018).

Conforme Silva (2012), além do risco de vida em função da exposição severa à fumaça e ao calor, o sinistro também pode comprometer e provocar o desabamento da estrutura. Dessa forma, é fundamental compreender, em função da tipologia construtiva, o comportamento dos elementos construtivos quando expostos a altas temperaturas. O tópico seguinte analisa especificamente o comportamento do material concreto.

2.2 O comportamento do concreto exposto a altas temperaturas

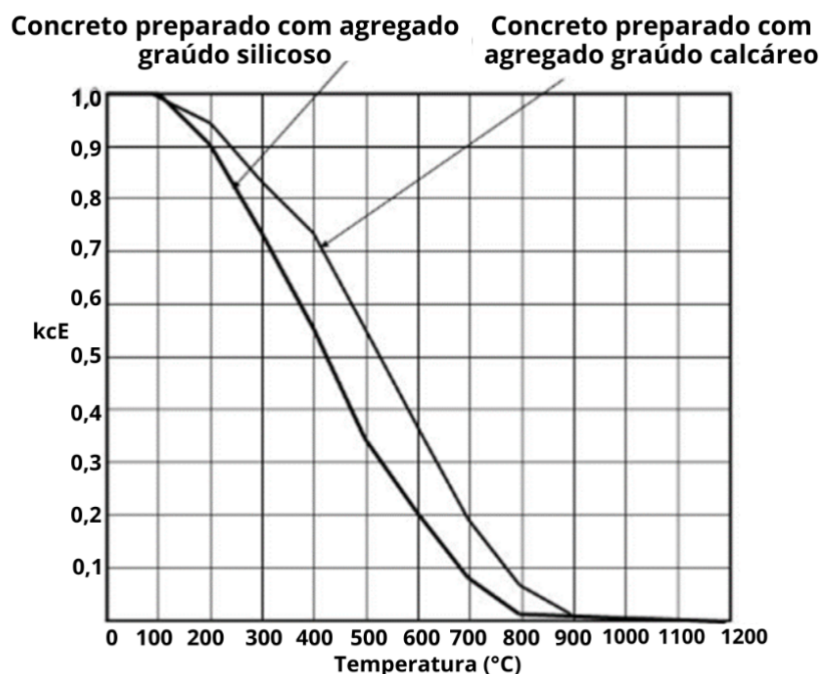
² Informação obtida, verbalmente, pelo Corpo de Bombeiros Militar de Barbacena MG.

O concreto é amplamente utilizado na construção civil devido, principalmente, a sua durabilidade quando exposto a diferentes condições, dentre elas, ao incêndio (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Trata-se de um material artificial composto por água, agregados e cimento, em diferentes proporções, que variam de acordo com a finalidade do uso. Em função dessa variabilidade, obtêm-se propriedades térmicas distintas, o que dificulta investigar com detalhes sua degradação (CUOGHI, 2006).

Define-se que a resistência ao fogo é o período de tempo, em que o elemento estrutural consegue manter suas funções de projeto, após exposto à ação do calor. Dependendo da intensidade e do tempo de exposição, podem-se gerar esforços internos adicionais na estrutura (SOUZA E RIPPER, 1998).

Dessa forma, durante um sinistro, o aumento da temperatura pode comprometer os elementos estruturais em função da perda de resistência devido à redução do módulo de elasticidade³ (SOUZA E SILVA, 2015). Conforme demonstra a FIG. 03, a redução é significativa entre 100 a 800°C e varia conforme o agregado.

Figura 03 – Redução do módulo de elasticidade do concreto, em função da temperatura



Fonte: NBR 15200, ABNT (2004).

De acordo com Lima et al (2004), o concreto apresenta elevada resistência ao fogo, quando comparado a outros elementos estruturais. Inclusive, pode ser utilizado

³ "Módulo de elasticidade é definido como a razão entre a tensão e a deformação reversível." (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

como um meio de proteção passiva para estruturas fabricadas em aço. Mehta e Monteiro (2008) completam que o concreto demonstra um bom desempenho por ser um material incombustível e não emitir gases tóxicos, contrariamente à madeira e ao plástico. Ainda, diferentemente deste último, é capaz de resistir a períodos, razoavelmente longos, quando submetido a temperaturas próximas de 700 a 800°C.

A fim de corroborar sobre o comportamento do concreto, quando exposto a altas temperaturas, realizou-se uma revisão sistemática de literatura, na qual se reuniram os principais apontamentos a respeito da sua resistência residual (TAB. 1).

Tabela 1 – Revisão sistemática sobre a resistência residual do concreto

AUTOR	TEMPERATURA	RESISTÊNCIA RESIDUAL
BAUER	200°C	85%
	300°C	75%
	500°C	50%
	800°C	50%
BILOW E KAMARA	200°C	80 a 90%
	300°C	70%
	500°C	30 a 40%
CUOGHI	400°C	75%
	700°C	45%
NEVILLE	200°C	50 a 92%
	400°C	45 a 83%
	600°C	38 a 69%
	800°C	20 a 36%
CÁNOVAS	200°C	95%
	300°C	95%
	400°C	88%
	500°C	75%
	600°C	55%
	900°C	10%
	1000°C	0%

Fonte: Bauer (2008); Bilow e Kamara (2008) apud Branco, Santos E Brito (2016) p. 20; Cuoghi (2008); Neville (2016); Cánovas (1988) apud Vespasiano (2016) p.20.

Observa-se que a literatura não apresenta posições integralmente acordantes sobre o tema. Enquanto Cánovas (1988) menciona que, a 200°C, o concreto

preserva 95% de sua resistência inicial, posição acordante com o citado pela NBR 15200 - Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, que aponta um percentual de 95% a 97%, Bauer (2008) apresenta uma menor resistência residual com 85%. Já os autores Bilow e Kamara (2008) e Neville (2016) apontam intervalos com variações de 80% a 90% e 50 a 92%, respectivamente.

A revisão tende a aproximar-se da norma, conforme o aumento da temperatura. Ao atingir 400°C, a referida NBR aponta que a resistência residual será em torno de 75% a 85%. Os posicionamentos tornam-se mais congruentes frente à temperatura de 800°C, pois os autores citam resistências entre 20% e 50% e a norma menciona valores entre 15% a 27%.

Segundo Neville (2016), consideram-se temperaturas próximas a 600°C o limite para manter a integridade estrutural do concreto produzido com cimento Portland. Em casos específicos de projeto, em que existe o risco de exposição a temperaturas superiores (fornos e churrasqueiras), recomenda-se o uso do cimento refratário. Para Rodrigues (1994 *apud* LORENZON, 2014, p.34), acima de 800°C, o concreto perde significativamente a sua resistência.

2.3 Análise da macroestrutura do concreto

Na estrutura macroscópica do concreto, é possível visualizar a interface entre os agregados e a pasta de cimento que, normalmente, possui uma coloração acinzentada. De acordo com Neville (2016), essa macroestrutura sofre alteração em sua coloração, conforme o aumento da temperatura. Entre 300 e 600°C, observa-se a coloração rosa ou vermelha, em torno de 900°C a cinza e, acima de 900°C, amarelada. A mudança na cor é permanente, o que permite estimar a temperatura máxima do incêndio e, conseqüentemente, a resistência residual do concreto.

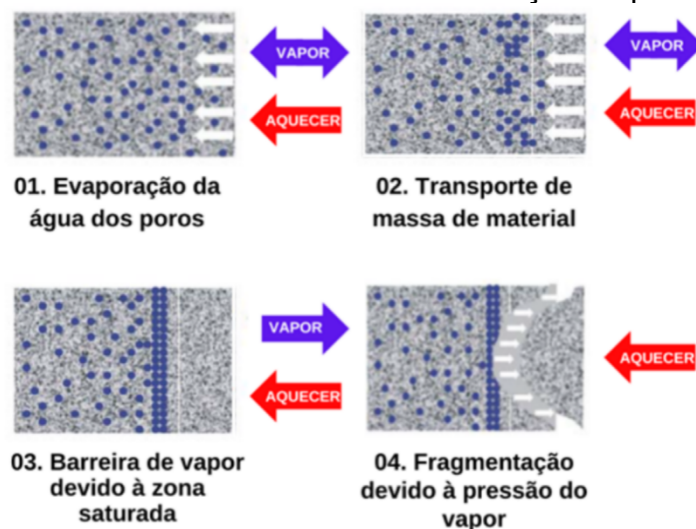
Conforme Souza e Ripper (1998), no decorrer de um incêndio, a estrutura sofre expansão térmica. Tratando-se de concreto armado, há uma expansão desigual entre o aço e o concreto, causando danos na aderência e tensões internas, que podem gerar uma desagregação. Apesar das chamas não se difundirem com facilidade para o interior, a exposição a elevadas temperaturas, por um determinado período de tempo, provoca uma considerável perda de resistência mecânica.

Verifica-se que o concreto, quando submetido a altas temperaturas, pode sofrer um fenômeno de lascamento, denominado *spalling*, em que fragmentos de

sua superfície são lançados à distância, ocasionando a diminuição da seção do elemento e uma possível exposição da armadura (GOMIDE, 2005).

O *spalling* pode ser causado por diversos fatores, sendo a pressão interna do vapor o mais relevante, o qual se desenvolve na rede de poros do concreto, com o aumento da temperatura (CUOGHI, 2006). Conforme a FIG. 04, quando a pressão de vapor gerada dentro do elemento é maior do que o alívio de pressão, ocorre o lascamento (CUOGHI, 2006; MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Figura 04 – Mecanismos de danos devido à formação de pressões de vapor



Fonte: Ciriades (2018).

Portanto, infere-se que, quanto mais baixa for a permeabilidade do concreto e mais alta for a velocidade de aumento da temperatura, maior será o risco de ocorrência de lascamento explosivo. Associado a esse fato, pode-se afirmar que, quando sujeito a elevadas temperaturas, quanto maior a relação água/cimento do concreto, maior será a perda de resistência mecânica (NEVILLE, 2016).

Os concretos de alta resistência são mais propensos ao lascamento, quando comparados aos concretos usuais. Isso porque possuem uma estrutura compacta e de baixa porosidade, o que impede o transporte dos vapores formados, durante o aquecimento, até à atmosfera. A pressão desses vapores aumenta, exageradamente, nas camadas externas próximas à superfície, podendo ocasionar o lascamento violento da região (COSTA, FIGUEIREDO E SILVA, 2002).

2.4 Análise da microestrutura do concreto

A palavra microestrutura remete a uma porção da macroestrutura do concreto, com proporções microscópicas. Uma microanálise precisa do desempenho real do concreto é bastante complexa, visto que é resultado da interação das propriedades associadas aos diferentes elementos constituintes do mesmo (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Como se trata de um material heterogêneo, seus componentes sofrem alterações pela ação do fogo, de acordo com suas características e especificidades, ou seja, desigual (SOUZA E RIPPER, 1998).

Conforme Neville (2016), no mínimo $\frac{3}{4}$ do volume do concreto é composto por agregados, portanto, o tipo, utilizado, afeta seu comportamento em alta temperatura. A perda de resistência, por exemplo, é significativamente menor se o agregado não contiver sílica, como o calcário. Isso ocorre devido ao coeficiente de dilatação dos mesmos. A sílica apresenta maiores coeficientes e, dessa forma, sofre maior perda de resistência devido à ação do fogo (CÁNOVAS, 1988, *apud* VESPASIANO, 2016).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os agregados silicosos que contém quartzo (arenito, por exemplo) provocam danos no concreto, em torno de 573°C. Já as rochas carbonáticas provocam um dano semelhante acima de 700°C. Ressalta-se que o seixo de dolomita oferece uma excelente resistência para o concreto, em função da calcinação desse carbonato ser endotérmica, ou seja, absorve o calor e diminui a velocidade de elevação da temperatura (NEVILLE, 2016).

Em outro aspecto, o efeito do aumento da temperatura, na pasta de cimento, também, depende do grau de hidratação e das condições de umidade. A pasta saturada contém grandes quantidades de água e, à medida que a temperatura aumenta, tanto a água adsorvida, quanto a água livre são rapidamente perdidas no concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A elevação da temperatura do concreto ocorrerá, somente, após a remoção de toda a água evaporável (SOUZA, 2009). No entanto, a existência de grandes quantidades de água pode causar danos, pois a alta taxa de aquecimento e a baixa permeabilidade da pasta de cimento podem danificar o concreto com a ocorrência do lascamento superficial, como já citado anteriormente (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

3 METODOLOGIA

3.1 Moldagem dos corpos de prova

Todo o procedimento de moldagem seguiu a NBR 5738 – Concreto — procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Considerando a classe de agressividade ambiental para zonas urbanas, especificada na NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto, o traço adotado foi de 1 : 1,788 : 2,815 : 0,564 (cimento, areia, brita e água), almejando uma resistência de 25 MPa. A confecção foi realizada no laboratório de Engenharia Civil do Centro Universitário Presidente Antônio Carlos – UNIPAC, em Barbacena MG, no mês de maio de 2022. Os materiais utilizados foram cimento Portland de alta resistência inicial CP-V ARI, água, agregado graúdo de origem calcária, nomeado brita 1 e agregado miúdo areia média natural, todos obtidos na região de Barbacena (MG).

Foram moldados 21 corpos de prova cilíndricos, com 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura (FIG. 05). O concreto foi colocado em duas camadas, sendo executados 12 golpes, em cada, para realizar o adensamento. O desenforme ocorreu após 48 horas da moldagem e os corpos foram mantidos em solução saturada de cal, em temperatura ambiente, durante 28 dias de cura.

Figura 05 – Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autoras (2022).

3.2 Simulação de altas temperaturas

As temperaturas às quais os corpos foram submetidos foram estabelecidas tendo como base a revisão de literatura. Portanto, definiu-se que a análise da perda

de resistência, pautaria dois valores: 400°C, inferior ao limite citado por Neville, e 800°C, apontado como limite crítico por Lorenzon.

O tempo de exposição foi definido através da NBR 14432 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento e da Instrução Técnica N° 06 do Corpo de Bombeiros de Minas Gerais (TAB. 2). Segundo a referida NBR, o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) é o período mínimo que uma edificação deve resistir a este. Varia conforme o tipo de ocupação e a altura do edifício, sendo dado em minutos e pode ser 30, 60, 90 ou 120. Optou-se por padronizar o tempo de exposição em 30 minutos, que corresponde ao TRRF de edificações residenciais até 12 metros de altura, tendo em vista o local de desenvolvimento do estudo (características das edificações).

Tabela 2 - Tempo requerido de resistência ao fogo (em minutos)

Grupo	Ocupação/Uso	Divisão	Profundidade do Subsolo h		Edificação Baixa	
			Classe S ₂ h > 10m	Classe S ₁ h ≤ 10m	Classe P ₁ h ≤ 6m	Classe P ₂ 6m < h ≤ 12m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60	30	30

Fonte: Adaptado da IT 06 (2005).

Para a simulação do fogo, foi utilizado um forno elétrico, do tipo mufla, modelo F3 - DM/T trifásico, com temperatura máxima de 1200°C, disponibilizado no laboratório de Farmácia do Campus Magnus, do Centro Universitário Presidente Antônio Carlos.

O resfriamento brusco ocorre quando há contato direto do elemento com água, após a elevação da temperatura (NEVILLE, 2016). Considerando que o resfriamento real de um elemento estrutural aproxima-se mais do resfriamento lento, optou-se por adotar esta modalidade. Com a finalidade de comparar a resistência residual do concreto submetido a altas temperaturas com a resistência de um elemento não comprometido, os corpos de prova foram distribuídos em três grupos: 7 corpos de prova permaneceram em temperatura ambiente; 7 corpos de prova foram elevados a 400°C e 7 corpos de prova foram elevados a 800°C.

3.3 Ensaio de compressão

Antes do rompimento, foi realizada a retificação dos corpos de prova, intencionando eliminar qualquer extremidade pontiaguda que alterasse o resultado

do ensaio. Houve a perda de 6 corpos de prova, portanto foram rompidos 15, divididos igualmente em 3 amostras. O ensaio aconteceu no laboratório da empresa CIMEC, na cidade de Barroso - MG. Para tal, foi utilizada uma prensa eletrohidráulica digital, com indicador microprocessado. O equipamento fornece a resistência em MPa, não sendo necessário realizar a conversão dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Posteriormente ao ensaio de simulação de altas temperaturas, foi possível notar alterações na coloração dos corpos de prova, bem como o surgimento de fissuras. Os que foram expostos a 400°C apresentaram uma coloração externa com manchas escuras acinzentadas, além de pequenos lascamentos. Essas características se intensificaram nos corpos submetidos a 800°C, sendo possível diferenciá-los visivelmente (FIG. 06). A coloração rosa ou vermelha descrita por Neville (2016), para corpos submetidos a 300 e 600°C, não foi observada.

Figura 06 – Corpos de prova temperaturas ambiente, 400°C e 800°C da esquerda para a direita.



Fonte: Autoras (2022).

Realizou-se o rompimento dos corpos de prova e foram obtidos os seguintes resultados (TAB. 3):

Tabela 3 – Resistência dos corpos de prova

TEMPERATURA	CP ₁ (MPa)	CP ₂ (MPa)	CP ₃ (MPa)	CP ₄ (MPa)	CP ₅ (MPa)	MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO	RESISTÊNCIA A RESIDUAL
AMBIENTE	26,09	24,79	24,80	23,55	25,52	24,95	0,85	100%
400°C	10,79	15,62	10,37	15,61	10,27	12,53	2,52	50,23%
800°C	11,10	15,12	16,35	7,80	9,05	11,88	3,34	47,63%

Fonte: Autoras (2022)

Os corpos de prova rompidos na temperatura ambiente apresentaram uma resistência residual média de 24,95 MPa, que foi considerada como a resistência característica das amostras. Observa-se, para esse grupo, um desvio padrão da ordem de 0,85, o que indica uma baixa dispersão dos dados em torno da média.

Em concordância com Neville (2016), que cita uma resistência residual entre 45 e 83%, a amostra ensaiada a 400°C apresentou valor médio de 50,23%. Todavia, houve contradição com Cuoghi (2006), Cánovas (1988) e a NBR 15200 (2012), que mencionam resistências entre 75 e 88%.

Ao tratar-se da amostra elevada a 800°C, os corpos de provas ensaiados apresentaram uma resistência residual média de 47,63%, próxima da amostra a 400°C. Analisando a revisão sistemática, nota-se um comportamento melhor do que o esperado, pela maioria dos autores, porém próximo à expectativa de Bauer (2008), que aponta um valor de 50%.

Sabe-se que quanto mais próximo de zero o valor do desvio padrão, mais uniforme é o comportamento da amostra. Portanto, através do cálculo deste parâmetro, observou-se que a dispersão das três amostras foi progressiva em relação ao aumento de temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura em que foram expostos, maior a variação no comportamento dos corpos de prova, confirmando a influência da heterogeneidade da mistura.

Constatou-se que não houve alterações na coloração interna dos corpos de prova. Este fato deve-se ao tempo de exposição, relativamente baixo. Sendo o concreto um material incombustível, a temperatura externa não é a mesma no seu interior.

A NBR 15200 menciona que o fator de redução da resistência do concreto ($k_{C,\theta}$), submetido a uma determinada temperatura, pode ser obtido, através da equação abaixo:

$$k_{C,\theta} = \frac{F_{C,\theta}}{F_{ck}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- $F_{c,\theta}$ é a resistência característica à compressão do concreto à temperatura θ ;
- $k_{c,\theta}$ é o fator de redução da resistência do concreto na temperatura;
- F_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto em temperatura ambiente na idade de 28 dias (TEIXEIRA, 2018; ABNT, 2012).

A referida norma cita valores de $k_{c,\theta}$ que permitem estimar a redução da resistência do concreto exposto à temperatura indicada. A fim de confrontar os dados obtidos no ensaio com os apresentados pela norma, calculou-se o fator de resistência residual relativa médio das amostras ($k_{c,\theta m}$), considerando $F_{ck,m}$ a média da resistência em temperatura ambiente (TAB. 4).

Tabela 4 – Comparação $k_{c,\theta}$ estimado pela NBR 15200 e obtido no ensaio.

TEMPERATUR A (°C)	VALORES NBR 15200/2004			VALORES OBTIDOS NO ENSAIO		
	F_{ck} (MPa)	$k_{c,\theta}$	$F_{c,\theta}$ (MPa)	$F_{ck,m}$ (MPa)	$k_{c,\theta m}$	$F_{c,\theta m}$ (MPa)
400°C	25,00	0,85	21,21	24,95	0,50	12,53
800°C	25,00	0,27	6,74	24,95	0,47	11,88

Fonte: Autoras (2022)

Infere-se que, em relação aos parâmetros normativos esperados, as amostras apresentaram comportamento divergente. A 400°C, o fator de redução foi de 0,50, bastante inferior ao citado pela norma (0,85). Já para a temperatura de 800°C, o fator foi superior, obtendo-se 0,47 sendo que a norma cita 0,27.

Especificamente para o concreto manufaturado, sua fabricação não possui o mesmo controle de qualidade que o concreto usinado, portanto, é possível ocorrer variações em um mesmo lote de amostras. Observa-se que, em relação ao esperado para a temperatura de 400°C, nenhum corpo de prova se aproximou de uma resistência residual de 21,21 MPa. Entretanto, para a temperatura de 800°C, foi encontrado para o corpo de prova 4 uma resistência residual de 7,8 MPa, valor próximo ao esperado de 6,74 MPa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo tratou da análise da resistência residual do concreto manufaturado, com agregados da região de Barbacena-MG, após a exposição a altas temperatura e resfriamento lento.

Diante dos resultados desse ensaio, confirma-se a dificuldade de se padronizar o comportamento do concreto exposto a temperaturas elevadas. Em desacordo com a maioria dos autores, foram obtidos valores bem próximos de resistência residual para as amostras ensaiadas a 400°C e 800°C. Vale ressaltar que, durante a simulação do incêndio, na mufla, não houve a ocorrência de *spalling*.

A revisão bibliográfica mostrou que existe divergência entre os parâmetros citados pela norma e entre os apontamentos feitos pelos autores pesquisados. Por se tratar de um material heterogêneo e com diversos componentes - que respondem de maneira desigual quando submetidos a altas temperaturas - o comportamento do concreto, perante o fogo, demonstrou não ser assunto totalmente convergente. Entretanto, sabe-se que, com acréscimo de temperatura, ocorre redução em sua resistência mecânica.

Logo, reafirma-se a importância da ampliação de estudos nessa área, visando dimensionar estruturas mais seguras. Para o prosseguimento dos estudos, as autoras recomendam variar o modo de resfriamento dos corpos de prova (lento e brusco), aumentar o tempo de exposição a altas temperaturas, alterar a relação água/cimento e utilizar maiores corpos de prova.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5738**. Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15200**. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15200**. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 13860**. Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997.

AVCB – Auto de vistoria do corpo de bombeiros. **Planfire**, s.d. Disponível em: < <https://www.planfire.com.br/o-que-e-avcb/>>. Acesso em 22 nov. 2022.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção. Concreto, madeira, cerâmica, metais, plásticos e asfalto: Novos materiais para construção civil**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. ISBN:978-85-216-1249-0.

BOMBEIROS combatem incêndio em casa em Barbacena. **G1 Zona da Mata**, 11 jun. 2019. Disponível em: < <https://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2019/06/11/bombeiros-combatem-incendio-em-casa-em-barbacena.ghtml>>. Acesso em 22 set. 2022.

BRASIL. **Lei nº 13.425/2017**. Estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público. Brasil: Senado Federal, 2017. Disponível em: < [https://legis.senado.leg.br/norma/17668401#:~:text=Estabelece%20diretrizes%20gerais%20sobre%20medidas,Civil%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias](https://legis.senado.leg.br/norma/17668401#:~:text=Estabelece%20diretrizes%20gerais%20sobre%20medidas,Civil%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias.)>. Acesso em: 27 out. 2022.

BILOW, D.; KAMARA, M. **Fire and concrete structures, Proc. Conf. Structures: Crossing Borders, ASCE**. 2008 apud BRANCO, F.; SANTOS, J. R.; BRITO, J. de. **Avaliação de Estruturas de Betão Degradadas pelo Fogo**. Lisboa: Revista ALCONPAT, 2013. 17-27p.

BRITEZ, C.; CARVALHO M.; HELENE, P. **Ações e efeitos deletérios do fogo em estruturas de concreto. Uma breve revisão**. Merida: Revista ALCONPAT, 2019. BRANCO, F.; SANTOS, J. R.; BRITO, J. de. **Avaliação de Estruturas de Betão Degradadas pelo Fogo**. Lisboa: Revista ALCONPAT, 2013. 17-27p.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. Patologia e Terapia do Concreto Armado. Ed. PINI. São Paulo, 1988 apud VESPASIANO, Ana B. R. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio: estudo de caso**. 2016. 70 f. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Engenharia civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2016.

CESAR, Marcondes. **Conheça os principais tipos de concretos utilizados no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://marcondescesar.com.br/conheca-os-principais-tipos-de-concretos-utilizados-no-brasil/>. Acesso em: 29 set. 2022.

CIRIADES, Jean Pierre. **SPALLING – Lascamento Explosivo e Progressivo do Concreto em Situações de Incêndio em Túneis**. 2018. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/spalling-lascamento-explosivo-e-progressivo-do-em-de-ciriades/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 23 out. 2022.

COMO a lei Boate Kiss mudou as normas de prevenção à incêndio? **Previnsa**, s.d. Disponível em: < <https://www.previnisa.com.br/blog/como-a-lei-boate-kiss-mudou-as-normas-de-prevencao-a-incendio/> >. Acesso em 22 nov. 2022.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR, **IT 06**. Segurança estrutural das edificações. Minas Gerais, 2005.

COSTA, Carla N.; SILVA, Valdir P. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais**. São Paulo: V Simpósio EPUSP, 2003.

COSTA, Carla N.; SILVA, Valdir P. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. Brasília: Universidade de Brasília, 2002.

COSTA, Carla N.; FIGUEIREDO, Antônio D. De; SILVA, Valdir P. e. **O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica**. São Paulo, 2002. 16p.

CUOGHI, Ricardo de Scarabello. **Aspectos de análise de risco das estruturas de concreto em situação de incêndio**. São Paulo, 2006. 239p.

GOMIDE, Kleber A. **Contribuição ao projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2005. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Engenharia civil, Universidade São Francisco. Itatiba, 2005.

INCÊNDIO atinge residência em Alto Rio Doce. **Foco na Notícia**, 30 jun. 2018. Disponível em: <<https://www.foconanoticia.com.br/noticia/3239/incendio-atinge-residencia-em-alto-rio-doce>>. Acesso em 23 set. 2022.

INCÊNDIO em garagem de prédio na descida dos Correios pode ter sido intencional. **Barbacena Online**, 15 mar. 2020. Disponível em: < <https://barbacenaonline.com.br/incendio-em-garagem-de-predio-na-descida-dos-correios-pode-ter-sido-intencional/#:~:text=Ele%20est%C3%A1%20prestando%20depoimento%20desde,pertencia%20%C3%A0%20sua%20ex%20Desposa.> >. Acesso em 21 set. 2022.

LIMA, Rogério C. A. de et al. **Efeito de altas temperaturas no concreto**. Porto Alegre, 2004. 16p.

LORENZON, Andressa. **Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas**. 2014. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Engenharia civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

MÃE e filhos morrem durante incêndio em residência em Carandaí. **G1 Zona da Mata**, 29 ago. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2018/08/29/mae-e-filhos-morrem-durante-incendio-em-residencia-em-carandai.ghtml>>. Acesso em 25 set. 2022.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. ISBN:978-85-98576-12-1. MORALES, Gilson; CAMPOS, Alessandro; FAGANELLO, Adriana M. P. **A ação do fogo sobre os componentes do concreto**. Londrina: Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, 2011.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Porto Alegre: Grupo A, 2016. E-book. ISBN 9788582603666. Disponível em: < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582603666/>> Acesso em: 20 set. 2022.

RODRIGUES, João Paulo Correia. **Recuperação de estruturas danificadas por incêndio**. 1994. 214 f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1994 apud LORENZON, Andressa. **Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas**. 2014. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Engenharia civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

SEITO, Alexandre Itiu et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto editora, 2008. p. 496 ISBN:978-85-61295-00-4.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. São Paulo: Editora Blucher, 2012. E-book. ISBN 9788521206859. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521206859/>. Acesso em: 20 set. 2022.

SOUSA, Douglas A. De; SILVA, Guilherme P. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2015. Graduação, Engenharia civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2015.

SOUSA, Moisés Magalhães de. **Estudo experimental do comportamento mecânico e da microestrutura de um concreto convencional após simulação das condições de incêndio**. 2009. Dissertação, Mestre em Construção civil, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255 p. il. ISBN 85-7266-096-8.

VESPASIANO, Ana B. R. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio: estudo de caso**. 2016. 70 f. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Engenharia civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2016.

TEIXEIRA, Guilherme Palla. **Análise experimental da resistência e do módulo de elasticidade de concretos com agregados da região de Viçosa-MG**. 1991. 63 f.

Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1991.