

Análise da resistência à compressão do concreto convencional submetido a altas temperaturas

Compressive strength analysis of conventional concrete subjected to high temperatures

Maryane Pipino Beraldo de Almeida¹, Jacqueline Roberta Tamashiro², Fabio Friol Guedes de Paiva², Lucas Henrique Pereira Silva^{2,3}, Angela Kinoshita^{2*}, Bruno do Vale Silva³

¹Toledo Prudente Centro Universitário, Engenharia Civil, Praça Raul Furquim, 09, Parque Furquim, 19030-430, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

²Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE), Programa de Pós Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Rodovia Raposo Tavares, km 572, 19067-175, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil.

³Instituto Federal de São Paulo (IFSP) – Câmpus Presidente Epitácio, rua José Ramos Junior, 27-50, Jardim Tropical, Presidente Epitácio, São Paulo, Brasil, CEP 19470-000

*angela@unoeste.br

Resumo

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, e o seu comportamento frente às altas temperaturas vem se tornando um assunto de interesse nos últimos anos, uma vez que a ocorrência de incêndios é de difícil previsibilidade, comprometendo a estrutura das edificações atingidas e, conseqüentemente, a segurança. O concreto apresenta um bom desempenho em situações com temperaturas elevadas, pois além da sua resistência, possui baixa condutividade térmica, não é combustível e não emite gases tóxicos. Porém, quando exposto ao fogo, sofre alterações físicas, químicas e mecânicas, capazes de comprometer a sua funcionalidade estrutural. Com o objetivo de analisar a resistência à compressão do concreto após sofrer efeitos de altas temperaturas com ação direta de chamas, realizaram-se ensaios em corpos de provas submetidos ao fogo em diferentes tempos, simulando uma situação real de incêndio. Os resultados comprovaram que, a partir de 2 horas de exposição ao fogo, o concreto perde 79,25% da sua resistência inicial. Observou-se também, que quanto maior o tempo de exposição, maior a energia térmica transferida e, conseqüentemente, maior é a perda da resistência à compressão, chegando à redução de 85,20% com 12h de exposição.

Palavras-chave: Concreto. Incêndio. Resistência à Compressão. Altas temperaturas.

Abstract

Concrete is one of the most used materials in civil construction, and its behavior in the face of high temperatures has become an issue of interest in recent years, since the occurrence of fires is difficult to predict, compromising the structure of the affected buildings and consequently, security. Concrete performs well in situations with high temperatures, because in addition to its resistance, it has low thermal conductivity, is not combustible and does not emit toxic gases. However, when exposed to fire, it undergoes physical, chemical and mechanical changes, capable of compromising its structural functionality. In order to analyze the compressive strength of concrete after suffering the effects of high temperatures with direct action of flames, tests were carried out on specimens submitted to fire at different times, simulating a real fire situation. The results showed that, after 2 hours of exposure to fire, the concrete loses 79.25% of its initial resistance. It was also observed that the longer the exposure time and the increase in temperature, the greater the loss of resistance to compression, reaching a loss of 85.20% with 12 hours of exposure.

Keywords: Concrete. Fire. Compressive strength. High temperatures.

Introdução

O concreto é um material amplamente disseminado e muito utilizado na construção civil, é possível encontrá-lo em casas, nos edifícios mais altos do mundo, em rodovias, pontes, usinas e outras mais. Entretanto, apesar de amplamente usado, a sua microestrutura é altamente heterogênea e complexa, dificultando um estudo com exatidão para estimar seu comportamento nas diversas situações as quais pode ser submetido. Porém, a partir da análise estrutural e comportamental de seus elementos, e também a interação deles, é possível obter conhecimento sobre este material [1].

Devido à grande variabilidade dos materiais empregados na confecção do concreto e ao surgimento de novos componentes no mercado da construção civil, existem muitos estudos incompletos sobre seu comportamento em situações de altas temperaturas, principalmente devido à sua complexidade. Todos os anos o mundo é surpreendido com inúmeras situações de incêndios em diversos locais, como indústrias, edifícios, hotéis e boates. Ao longo do tempo, isso tem se tornado uma preocupação crescente, já que não é incomum o colapso de estrutura, resultando em grandes danos pessoais e materiais [2,3].

No Brasil, pode-se citar como exemplo, o incêndio no Museu Nacional do Brasil, ocorrido em 2018 e o incêndio em Santa Maria – RS, na boate Kiss, que ocorreu em 2013. Este último, devido a erros de projeto e falhas na adequação dos equipamentos de combate ao fogo, houve morte de 242 pessoas e grandes perdas materiais. E em consequência disso foi criada uma nova lei complementar Nº 14.376 de 26 de dezembro de 2013, conhecida como Lei Kiss, que trata das normas de segurança, prevenção e proteção contra incêndios válidas para todo o Estado do Rio Grande do Sul, tomando como base algumas instruções técnicas do estado de São Paulo, dado que é o estado mais avançado no quesito segurança contra incêndio [4,5].

O nível dessas danificações pode variar desde a simples mancha produzida pela fumaça, até a destruição total da edificação por combustão ou pela perda de resistência dos elementos estruturais, sendo, este último, mais comum. Essa perda da resistência depende basicamente do grau de intensidade do incêndio, ou seja, depende das deformações, das fissuras e alterações das propriedades dos materiais que compõem a estrutura [6,7].

Conforme ocorre elevação da temperatura o concreto vai sofrendo uma série de mudanças na coloração, principalmente quando os agregados são siliciosos e calcários, por conta da presença de compostos ferrosos nos mesmos [3]. Sendo assim, a inspeção visual é a primeira forma de analisar se um concreto foi submetido a altas temperaturas.

De acordo com Cánovaz [8] a cor do concreto submetido a temperatura de até 200 ° C não sofre alteração e não provoca reduções significativas de resistência. Entre 300 ° C à 600 ° C a cor muda de rosa a vermelho, diminuindo a resistência à compressão em até 50% do seu valor original. Acima de 600 ° C e até 950 ° C a cor muda para um cinza com pontos avermelhados, o que indica friabilidade e alta sucção de água, além disso, a resistência à compressão se torna muito baixa. De 950 ° C a 1000 ° C a cor muda para amarelo alaranjado e o concreto começa a sintetizar-se. Entre 1000 ° C e 1200 ° C o concreto sofre sinterização, sua cor se torna amarelo claro e suas resistências são totalmente nulas, restando só um material calcinado e mole.

Muitos incêndios causam situações catastróficas por provocarem a perda da funcionalidade da estrutura, fazendo com que a edificação entre em colapso, já que altas temperaturas reduzem as propriedades mecânicas do concreto. Sendo assim, é de suma importância o estudo aprofundado desse material, para que se possa compreendê-lo cada vez mais, garantindo assim, a segurança ao incêndio nas edificações, já que além de vidas, há muitos valores históricos por trás de diversas obras.

Portanto, este trabalho tem por objetivo realizar um estudo acerca da viabilidade técnica do concreto submetido a altas temperaturas, apresentando um processo de verificação e simulação de corpos de provas em situação de incêndio, permitindo analisar sua perda de resistência e a mudança de suas propriedades.

Material e Métodos

O concreto utilizado no processo de fabricação dos corpos de prova foi constituído por cimento Portland tipo CPII-Z, agregado graúdo de origem basáltica, denominado brita, de graduação nº 1 com Diâmetro máximo de 19 mm, o agregado miúdo foi a areia natural com Diâmetro máximo de 4,8 mm e a água utilizada é a fornecida pela rede de abastecimento.

O traço unitário do concreto utilizado, em massa, foi de 1: 2: 3: 0,6 (cimento: areia: brita: água) e teor de argamassa igual a 50%. Este traço foi definido através de parâmetros e recomendações da NBR 6118 [9].

Moldagem e Cura

Foram desenvolvidos 15 corpos de prova cilíndricos, divididos em 5 grupos de 3 corpos de provas, de acordo com a NBR 5739 [10] que define que para formas de moldagem e cura de corpos de provas cilíndricos de concreto, em moldes com altura igual ao dobro do diâmetro. Portanto, os moldes utilizados foram metálicos com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, conforme a Figura 1. Para a melhor desmoldagem dos corpos de prova, aplicou-se óleo mineral em toda superfície interior da forma.

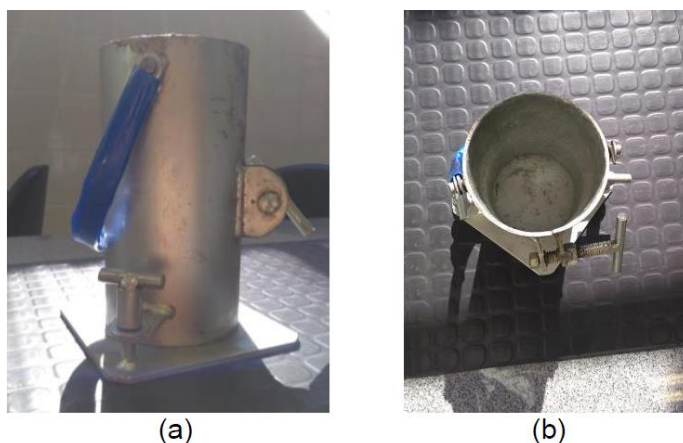


Figura 1: Forma Cilíndrica 10 cmx20 cm

Antes da concretagem, todos os materiais necessários foram separados e pesados em balança digital com precisão de 10 gramas. A mistura foi realizada em uma betoneira com capacidade de 200 L, indicada na Figura 2, que ficou ligada até que a massa ficasse com uma textura homogênea.



Figura 2: Betoneira Monofásica de 200L

Antes da moldagem, foi realizado o ensaio de consistência do concreto, através do abatimento do tronco de cone (Figura 3), que é medido obedecendo a NM 67 [11], mais conhecido como *Slump Test*, que consiste em dividir a massa de concreto fresco em três partes e depositar, uma de cada vez, em um molde no formato de tronco de cone metálico com o auxílio de uma concha padronizada. Cada parte de massa depositada recebeu 25 golpes com uma haste metálica de adensamento. O molde foi retirado e mediu-se o abatimento que é a diferença entre a altura do molde e o escoamento do concreto, resultando em um valor de 19 cm.



Figura 3: Ensaio de Abatimento de Tronco

Após a realização do ensaio de abatimento, os corpos de prova foram moldados através de adensamento manual, ou seja, foi colocado metade do volume de concreto na forma e adensado com 12 golpes. Em seguida, preencheu-se volume restante da forma e adensou-se da mesma maneira que anteriormente, regularizando sua superfície superior.

Com a finalização da moldagem, os corpos de prova foram acomodados em local protegido de sol e vento por 24 horas (Figura 4). Após isso, foram desmoldados e depositados em um tanque para a cura submersa em solução saturada com hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, durante 28 dias (Figura 5)



Figura 4: Moldes com Concreto Fresco



Figura 5: Corpos de Prova em Cura Submersa

Simulação ao Fogo

Conforme já citado, os corpos de prova foram separados em grupos, um desses grupos não foi submetido a altas temperaturas para serem utilizados como referência no ensaio de resistência à compressão. E para a simulação do incêndio os outros corpos de prova, com idade de 28 dias, foram depositados em tambor de ferro junto a madeira e submetidos ao fogo (Figura 6) por tempos diferentes, seguindo a Tabela 1.



Figura 6: Simulação de Fogo

Tabela 1: Sequência dos Corpos de Prova

Grupo 1 2 horas ($>250^{\circ}\text{C}$)	Grupo 2 4 horas ($>250^{\circ}\text{C}$)	Grupo 3 6 horas ($>250^{\circ}\text{C}$)	Grupo 4 12 horas ($>250^{\circ}\text{C}$)	Grupo 5 Referência (temp. ambiente)
CP1	CP4	CP7	CP10	CP13
CP2	CP5	CP8	CP11	CP14
CP3	CP6	CP9	CP12	CP15

Vale ressaltar que todos os corpos de prova ficaram expostos em uma temperatura superior a 250°C , e tiveram um resfriamento lento e natural até a temperatura ambiente. A temperatura foi conferida com um termômetro digital infravermelho FLUKE modelo VT04A (Figura 7), sendo possível simular a realidade da dinâmica de um incêndio, já que os mesmos foram submetidos a chamas, porém não foi possível coletar temperaturas exatas para a comparação, devido ao limite térmico do termômetro utilizado (250°C).



Figura 7: Simulação de Fogo

Ensaio de Resistência à Compressão

Após exposição ao fogo e devidamente resfriados, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Para a ruptura, foi utilizado o equipamento de ensaios mecânicos da marca INSTRON EMIC modelo 23-100, com acionamento elétrico e indicador digital de leitura e capacidade máxima de carga até 1 MN. Para regularização do topo e da base dos corpos de prova utilizou-se neoprene, por ser um método prático e que não utiliza água, evitando uma possível reidratação.

Resultados e Discussão

Como dito anteriormente, não foi possível constatar temperaturas exatas a qual o concreto foi submetido, devido ao limite de temperatura do termômetro utilizado, mas de acordo com literaturas é possível fazer uma breve análise e comparação no quesito físico, coloração e em relação as resistências obtidas.

Na Figura 8 é possível observar a aparência dos corpos de prova após o aquecimento. Foi constatado a presença de rachaduras, a ocorrência de lascamentos e uma leve mudança na coloração aproximando para tons mais amarelados com maior tempo de exposição.

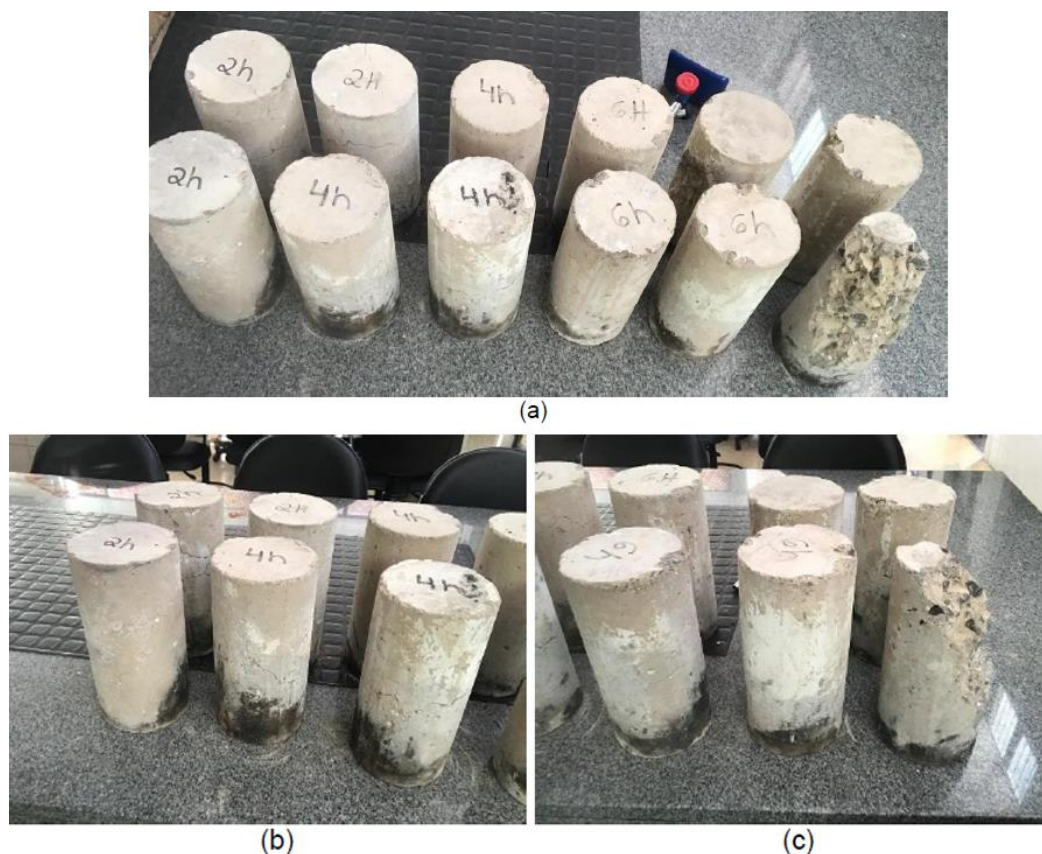


Figura 8: Corpos de Prova Após Aquecimento

Os corpos de prova do grupo 1, que ficaram em altas temperaturas por 2 horas, permaneceram com a mesma coloração acinzentada, porém tiveram muitas rachaduras (Figura 9). Os que ficaram 4 horas, grupo 2, não tiveram tantas rachaduras, mas houve um lascamento maior (Figura 10) em relação aos do grupo 1.

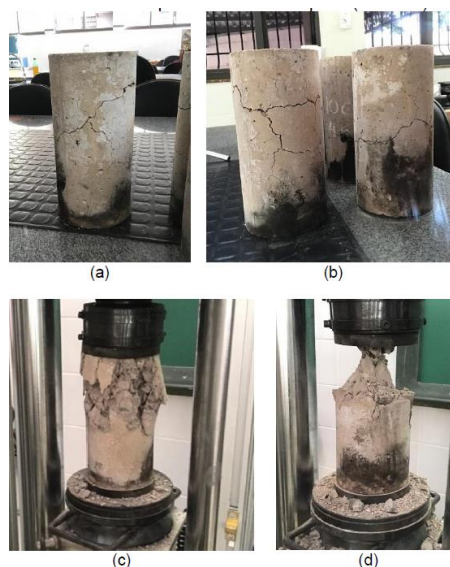


Figura 9: Corpos de Prova Grupo 1 (2 horas)

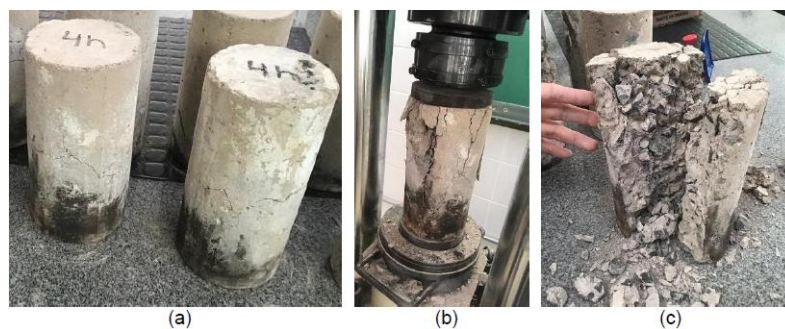


Figura 10: Corpos de Prova Grupo 2 (4 horas)

Os corpos de prova que ficaram expostos ao fogo durante 6 horas (grupo 3) e 12 horas (grupo 4), tiveram uma leve mudança na coloração. Nos do grupo 3, os corpos de prova não tiveram muitas rachaduras, mas ocorreu lascamentos em relação aos anteriores (Figura 10), também é possível observar que o concreto ficou mais esbranquiçado com um leve amarelado na parte interna (Figura 10c).



Figura 11: Corpos de Prova Grupo 3 (6 horas)

no grupo 4, um dos corpos de prova explodiu e outro perdeu parte da superfície lateral, durante o aquecimento (Figura 12). Este fenômeno de deslocamento, que ocorreu nestes dois corpos de prova, é conhecido como “*spalling*”, o qual já foi explicado anteriormente. Além disso, na coloração há presença do leve amarelado e existem alguns pontos verdes (Figura 12d e 12c).



Figura 12: Corpos de Prova Grupo 4 (12 horas)

A Tabela 2, a seguir, apresenta os valores de resistência à compressão em MPa para cada corpo de prova em relação ao tempo em que este ficou exposto em altas temperaturas, também é apresentada a média aritmética das resistências obtidas. Também é possível observar a resistência obtida para os corpos de prova utilizados como referência, que não foram submetidos a altas temperaturas.

Tabela 2: Resistência à Compressão dos Corpos de Prova

Tempo x Resistência	Média (MPa)	Diminuição de Resistência
2 horas	2,65	79,25%
4 horas	2,24	82,46%
6 horas	2,02	84,18%
12 horas	1,89	85,20%
Referência	12,77	-

Baseados na tabela acima, foram elaborados a Figura 13, que mostra a diminuição média de resistência do concreto à compressão em relação ao tempo de exposição.

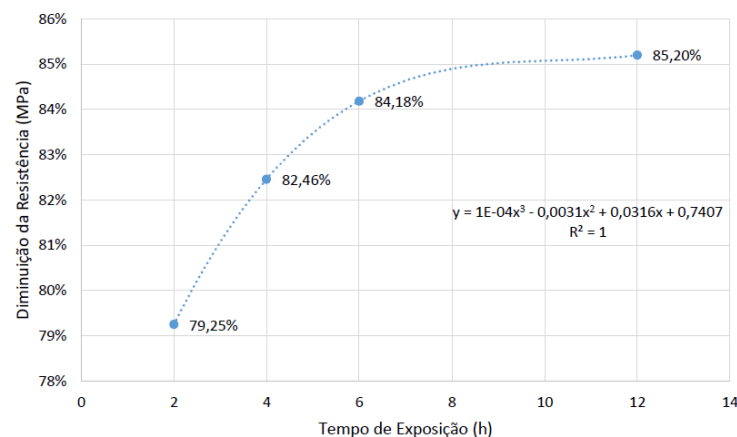


Figura 13: Diminuição da Resistência à Compressão em Porcentagem

Com base na Tabela 2 e Figura 13, é possível notar uma perda de resistência superior a 79%, quando comparada com a resistência dos corpos de prova referência. Dados da pesquisa de Borba Junior et al. [7], mostram que o concreto começa a ter uma perda de resistência mais acentuada a partir dos 500 °C. Na mesma pesquisa, é observado que os corpos de prova ensaiados a uma temperatura de 800 °C, durante 30min., tiveram a redução da resistência em torno de 70%, e para uma exposição de 90min., a 800 °C, houve uma perda de 80%. Porém, Crispim e Crispim [12] obtiveram em seus estudos uma perda de até 90% da resistência do concreto exposto à 700°C, e resistência nula para os corpos de prova submetidos à 900°C.

Estudos conduzidos por Mello e Beltrame [2] mostraram concretos submetidos a diferentes temperaturas, durante 30 minutos, tendo perdas de resistência de 15,40% a 80,18%, quando os picos foram de 500°C a 800°C, respectivamente.

Em estudos realizados por Hertz [13], ocorreram explosões em concretos com diferentes agregados (siliciosos e carbonáticos) a 700 °C. Ele defende que tal efeito ocorreu devido à expansão do agregado neste nível de temperatura, o que pode justificar a explosão de um dos corpos de prova.

Em relação a coloração, é possível concluir que a descrição de Cánovaz, sobre a mudança de cor do concreto, não levou em conta os diferentes tipos de materiais na composição do concreto, já que os corpos de prova não obtiveram a coloração descrita.

Como já visto anteriormente, quanto maior a temperatura atingida menor será a resistência à compressão. E isto afeta diretamente a integridade dos corpos de prova, ou seja, quanto maior a temperatura e o tempo de exposição ao fogo, mais fraco o concreto fica e este começa a se esfarelar com facilidade.

Considerações Finais

Os resultados obtidos constatarem que os concretos submetidos à altas temperaturas com exposição de chamas possuem perdas consideráveis da resistência à compressão.

Para todos os tempos de exposição ao fogo a perda da resistência foi superior a 79% quando comparado ao concreto de referência. É possível concluir também que conforme aumentou-se o tempo de exposição e a transferência térmica maior foi a perda da funcionalidade estrutural.

Outro aspecto observado foi no quesito coloração, não houve grande alteração de cor na parte externa, porém internamente foi possível observar um leve amarelado nos corpos de prova que ficaram tempos maiores em exposição ao fogo, fato importante principalmente em perícias técnicas de engenharia relacionadas a sinistros de incêndios, pois a colocação pode-se tornar um indicativo da temperatura atingida na estrutura.

Além disso, ocorreu o deslocamento em dois corpos de prova. A natureza da ocorrência deste fenômeno pode ser muito variada e imprevisível, mas acredita-se que a pressão provocada nos poros existentes ocasionou o efeito “spalling”.

Por fim, a partir do estudo feito é perceptível a necessidade do aprimoramento dessa linha de pesquisa sobre o comportamento do concreto submetido a altas temperaturas, já que o mesmo é um material complexo e com muitos estudos a serem realizados.

Para um estudo mais detalhado, recomenda-se a utilização de equipamentos a fim de obter-se temperaturas exatas para uma análise e comparação mais certa; a realização de ensaios com corpos de provas expostos à altas temperaturas durante um tempo inferior a 2 horas; a utilização de dois tipos de resfriamento (brusco e lento); e uma possível análise da microestrutura do concreto após o aquecimento.

Referências

- [1] R.C.A. Lima, L.D. Kirchhof, C.A. Casonato, L.. P. Silva Filho, Efeito de Altas Temperaturas no Concreto, in: II Seminário de Patologia das Edificações, Porto Alegre, 2004: pp. 1–15.
- [2] A.B. de Mello, N.A. Beltrame, Comportamento do concreto convencional exposto a altas temperaturas, Rev. Técnico-Científica Do CREA-PR. 13 (2018) 1–22.
- [3] G. Morales, A. Campos, A.M.P. Faganello, A Ação do fogo sobre os componentes do concreto, Semin. Ciências Exatas e Tecnológicas. 32 (2011) 47–55. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2011v32n1p472011>.
- [4] T.B. Nascimento, E.C. Marin, Danceterias como espaço de lazer: o cenário legislativo posterior ao desastre na boate Kiss, Motrivivência. 30 (2018) 140–154. <https://doi.org/10.5007/2175-8042.2018v30n56p140>.
- [5] C.D.O. Mendes, L.A. Fonseca, Informação e sensacionalismo no jornalismo de revista: análise da cobertura da tragédia da boate Kiss, Cad. Comun. 1 (2019). <https://doi.org/10.5902/2316882X35744>.
- [6] A. LORENZON, Análise da Resistência Residual do Concreto Após Exposição a Altas Temperaturas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.
- [7] J.E.F. Borba Júnior, Á.A. Pereira, G.G. Nobre, R.S. Coelho Junior, I.P. Oliveira, Avaliação de estrutura de concreto armado após situação de incêndio: estudo de caso em Brasília, Brazilian J. Dev. 5 (2019) 23870–23888. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-085>.
- [8] M.F. Cánovas, Patologia e terapia do concreto armado, PINI, São Paulo, 1988.
- [9] ABNT, NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.
- [10] ABNT, NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2018.
- [11] CMN, NM 67: Concreto - Determinação de consistência pelo abatimento do tronco de cone, Comitê Mercosur de Normalizacion, 1996.
- [12] C.M.R. Crispim, H.A.F. Crispim, ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, Brazilian J. Dev. 6 (2020) 60669–60697. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-473>.
- [13] K.D. Hertz, Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Saf. J. 38 (2003) 103–116. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00051-6).