



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS DOSADOS EM CENTRAL COM SEIXO E BRITA SOB ALTAS TEMPERATURAS

Lohameky Gomes Alves

**Belém - PA
Novembro/2024**

Lohameky Gomes Alves

**DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS DOSADOS EM CENTRAL
COM SEIXO E BRITA SOB ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil
Orientadora: Profª Drª Nívea Gabriela Benevides Albuquerque

**Belém - PA
Novembro/2024**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Lohameky Gomes Alves

DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS DOSADOS EM CENTRAL COM SEIXO E BRITA SOB ALTAS TEMPERATURAS

Belém, 28 de novembro de 2024

Prof.^a Nívea Gabriela Benevides Albuquerque
Dr.^a pela UnB
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Isaura Nazaré Lobato Paes (UFPA)
DSc. pela UnB

Prof.^a Luciana Carvalho Queiroz (UFPA)
MSc. pela UFRGS

CONCEITO FINAL: BOM

DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS DOSADOS EM CENTRAL COM SEIXO E BRITA SOB ALTAS TEMPERATURAS

Lohameky Gomes Alves ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Faculdade de Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará

RESUMO

A segurança de estruturas em situação de incêndio é um tema que ganhou bastante abrangência no decorrer dos anos, principalmente após a ocorrência de grandes sinistros que geraram diversos debates acerca das medidas a serem tomadas e avaliadas a respeito da resistência e segurança das estruturas contra incêndios, culminando também em legislações que estão em constante modernização. Dito isto, este estudo tem por objetivo a análise do comportamento do concreto estrutural (30 a 40 MPa) em condições simuladas de incêndio, por meio de um estudo de caso com corpos de prova dosados em centrais, utilizando agregados convencionais – brita e seixo encontrados na RMB – com foco na influência desses materiais na redução da resistência residual e no módulo de elasticidade após exposição a elevadas temperaturas visando simular um incêndio. Para tanto, a metodologia adotada foi implementada por meio de ensaios laboratoriais de resistência à compressão e módulo de elasticidade em 24 corpos de prova (CP), sendo 12 CPs constituídos pelo agregado brita e os remanescentes pelo agregado seixo, os quais foram dosados em centrais. Estes foram submetidos a temperaturas de 400 °C, 600 °C e 800 °C, mediante o emprego de um forno, visando à simulação de um incêndio. Os resultados indicaram que os corpos de prova de seixo apresentaram bom desempenho em altas temperaturas, com menor perda de resistência e maior resistência à expansão térmica. Além disso, o seixo exibiu maior resistência a fissuras, provavelmente devido à melhor compatibilidade térmica com a pasta de cimento. Já os corpos de prova de brita, com o prolongamento da exposição até 90 minutos, começaram a apresentar fissuras a 600 graus, evidenciando maior suscetibilidade a danos térmicos.

Palavras-chave: Incêndio. Segurança de Estruturas. Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

The safety of structures in fire situations is a topic that has gained a lot of coverage over the years, especially after the occurrence of major accidents that generated several debates about the measures to be taken and evaluated regarding the resistance and safety of structures against fire, also culminating in legislation that is constantly being modernized. That said, the aim of this study is to analyze the behavior of structural concrete (30 to 40 MPa) in simulated fire conditions, by means of a case study with centrally dosed specimens, using conventional aggregates - gravel and pebbles found in the RMB - with a focus on the influence of these materials on the reduction in residual strength and modulus of elasticity after exposure to high temperatures in order to simulate a fire.

To this end, the methodology adopted was implemented by means of laboratory tests of compressive strength and modulus of elasticity on 24 specimens (SP), 12 of which were made up of gravel aggregate and the rest of which were made up of pebble aggregate, which were dosed in central batches. These were subjected to temperatures of 400 °C, 600 °C and 800 °C, using an oven to simulate a fire. The results showed that the pebble specimens performed well at high temperatures, with less loss of strength and greater resistance to thermal expansion. In addition, the pebbles showed greater resistance to cracking, probably due to better thermal compatibility with the cement paste. The gravel specimens, on the other hand, began to show cracks at 600 degrees as exposure was extended to 90 minutes, showing greater susceptibility to thermal damage.

Keywords: Fire. Structural safety. Mechanical properties.

1. INTRODUÇÃO

Diante das diversas ocorrências de sinistros ao longo dos anos, se intensificaram os debates acerca da segurança contra incêndio em edificações, gerando pesquisas, adoção de medidas protetivas, leis e regulamentos. No Brasil, houve uma grande catástrofe que resultou em uma lei sobre prevenção de incêndio, a Lei 13.425, de 30 de marco de 2017, também conhecida como Lei “Boate Kiss”, a qual foi criada após um grande incêndio que ocorreu em uma casa noturna, no ano de 2013, na cidade de Santa Maria, uma cidade universitária localizada no Rio Grande do Sul. A tragédia da Boate Kiss deixou 242 mortos e 623 feridos, que resultou em uma grande comoção e reflexão nacional em relação as medidas de segurança, prevenção e combate a incêndios no Brasil ensejando na criação da lei supracitada.

No estado do Pará, de acordo com as estatísticas do Corpo de Bombeiros Militar do Pará (CBMPA), foram registrados no período de 01/01/2013 a 23/02/2024 um total de 11.259 incêndios em edificações. Restringindo-se a uma avaliação da capacidade portante do sistema estrutural dessas construções, observa-se frequentemente que grande parte das edificações de menor porte nos arredores da Região Metropolitana de Belém (RMB) empregam o concreto que utiliza seixo rolado como agregado graúdo, dada à abundância na região norte do país, em contraponto à pedra britada, agregado majoritariamente empregado em pesquisas relativas ao assunto.

O concreto, por se tratar de um material composto originado da mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos, com ou sem aditivos, cuja resistência se desenvolve pelo endurecimento da pasta de cimento, ao ser submetido a altas temperaturas, conduz a diferentes reações que variam conforme seus constituintes. Inicialmente, o concreto apresenta bom desempenho em temperaturas elevadas, pois é não combustível, possui baixa condutividade térmica, não libera gases tóxicos e resiste ao fogo por um tempo considerável, mantendo boas propriedades (Lorenzon, 2014). No entanto, como destacam Mehta e Monteiro (1994), pode resultar em uma degradação desigual de suas propriedades, afetando aspectos como resistência e módulo de elasticidade – que comprometem a rigidez e integridade das estruturas, além de provocar alterações na coloração, esfarelamento e fissuração. Assim, a interação desses fatores torna a análise do comportamento do concreto sob condições extremas mais desafiadora, que dificultam a obtenção de resultados precisos, ainda mais quando se avalia as condições construtivas da região Norte do país.

1.1 JUSTIFICATIVA

De maneira geral, o fato de grande parte das construções regionais em concreto se limitarem a resistências características baixas já é determinante para a vulnerabilidade ao risco de incêndio. Como forma de controle dessa particularidade, buscou-se por concretos dosados em central contidos na menor faixa admissível pela NBR 6118:2014 na RMB, sendo produzidos com agregados convencionais para fins estruturais. Buscou-se avaliar a estabilidade de concretos produzidos com seixo e brita sujeitos a uma elevação padronizada de temperatura sendo simulado em laboratório visando obter condições similares a um incêndio.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é investigar o desempenho mecânico de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos, quando submetidos a altas temperaturas. Os objetivos específicos incluem a análise da influência do tipo de agregado na redução da resistência residual e do módulo de elasticidade, além de identificar o impacto do aumento de temperatura nas propriedades mecânicas do concreto. Foram realizados experimentos laboratoriais em 24 corpos de prova (CP)

com resistência de 30 MPa, sendo 12 com agregado de brita e 12 com agregado de seixo. Os corpos de prova foram expostos a temperaturas de 400 °C, 600 °C e 800 °C, simulando as condições de um incêndio por meio de um forno.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Os danos causados por incêndios em estruturas de concreto variam desde manchas visíveis até deformações e fissuras mais sutis. O principal problema é a perda de resistência dos elementos estruturais, que depende da intensidade e duração do fogo. Incêndios intensos podem alterar as propriedades dos materiais, comprometendo sua integridade e causando deformações irreversíveis. Fissuras aumentam a vulnerabilidade da estrutura, enquanto vazios e pontos enfraquecidos facilitam a passagem de calor. O gradiente térmico, causado pelo aumento e queda brusca de temperatura, prejudica a aderência do concreto. Entender esses processos é essencial para avaliar os danos e planejar intervenções adequadas.

2.1 IMPACTOS NA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO QUANDO EXPOSTO A ALTAS TEMPERATURAS

A exposição do concreto a altas temperaturas provoca transformações macroscópicas e microestruturais, resultando em alterações físicas e químicas devido à sua natureza polifásica. O estudo desses efeitos tem ganhado relevância, pois o concreto apresenta alterações no comportamento complexas devido ao calor, como deslocamentos, fissuração e redução da resistência mecânica.

2.1.1 Efeitos Térmicos na Macroestrutura do Concreto

A estrutura ao ser exposta ao fogo pode apresentar visualmente características de modificações. De acordo com Short *et al.* (2001) o primeiro aspecto a ser avaliado em uma estrutura incendiada geralmente é o visual, observando mudanças na coloração, fissuras e lascamentos (*Spalling*).

O fenômeno conhecido como *spalling* refere-se à fragmentação das camadas superficiais do concreto quando este é exposto a temperaturas muito altas e a aumentos rápidos de calor, como ocorre durante incêndios. Esse processo pode ocorrer imediatamente após a exposição ao calor intenso, frequentemente acompanhado de explosões, ou em estágios posteriores do fogo, quando o concreto perde sua resistência devido ao aquecimento, fazendo com que fissuras se formem e fragmentos se soltem da superfície (Kodur,2014).

2.1.2 Efeitos Térmicos na Microestrutura do Concreto

O concreto, por sua natureza heterogênea, apresenta diversas alterações microestruturais quando exposto ao aquecimento, como mudanças nas fases cimentícias (C-S-H, portlandita, etringita, entre outras), nos agregados e na pasta de cimento. Segundo Hager (2013), a degradação inicial ocorre na etringita, que se decompõe antes de 100°C, e a pasta de cimento já sofre danos parciais a 105°C. Com o aumento da temperatura, ocorrem transformações adicionais que comprometem ainda mais a microestrutura do concreto. Diversos estudos sobre essas alterações físico-químicas foram realizados e estão sintetizados na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1: Transformações físico-químicas na pasta de cimento durante aquecimento

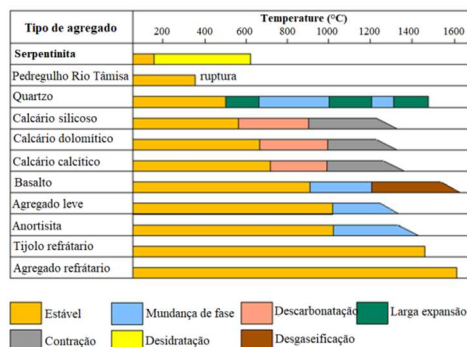
| TEMPERATURA (°C) | TRANSFORMAÇÕES |
|---------------------|---|
| 20 a 100 °C | Ocorre a evaporação da água livre nos poros, gerando retração do concreto, com aumento da porosidade e causando micro-fissuras. Pouca alteração da resistência mecânica. |
| 150 °C | Pico do primeiro estágio de decomposição do silicato de cálcio hidratado. |
| 100 a 300 °C | Perda da água ligada fisicamente ao concreto nos poros, ocorrendo a contração da pasta, provocando micro-fissuras. |
| 350 °C | Ruptura de alguns agregados do tipo seixos de rio. |
| 374 °C | A partir desta temperatura não existe mais água livre nos poros |
| 400 a 600 °C | Perda da água ligada quimicamente ao concreto, com decomposição dos produtos de hidratação e desidratação do hidróxido de cálcio. Queda na resistência, retração de volume e aumento de fissuras. |
| 700 °C | Dissociação do CaCO_3 em $\text{CaO} + \text{CO}_2$ |
| 720 °C | Segundo pico da decomposição do silicato de cálcio hidratado |
| 800 °C | Perda total da água quimicamente combinada. |
| 1200 °C | Início da sinterização do concreto |
| 1400 °C | Concreto sinterizado. |

Fonte: Adaptado de Costa *et al.* (2002); Castellote *et al.* (2003); Georgali e Tsakiridis (2005); Marcelli (2007).

Quando o concreto é exposto a altas temperaturas, a pasta de cimento inicialmente sofre uma expansão, mas, a partir de 300°C, essa pasta começa a se contrair devido à perda de água. Durante esse processo, os agregados continuam a se expandir, o que gera tensões internas no material, favorecendo o surgimento de fissuras e o

desprendimento de partículas da superfície. Além disso, materiais específicos reagem de maneiras distintas: o quartzo, por exemplo, sofre uma expansão considerável a 573°C por meio de uma transformação cristalina, enquanto a calcita passa a se contrair a partir de 900°C, devido à sua decomposição. A fib (2007) aponta que, apesar das mudanças físicas e químicas na pasta de cimento e da importância da água na mistura, são os agregados que desempenham um papel crucial no comportamento térmico do concreto quando ele é considerado como um material composto, conforme verifica-se na figura 1.

Figura 2: Comportamento de diversos agregados durante o aquecimento (adaptado de fib, 2007).



Fonte: Adaptado de fib (2007).

2.1.3 Efeitos Térmicos nos Agregados

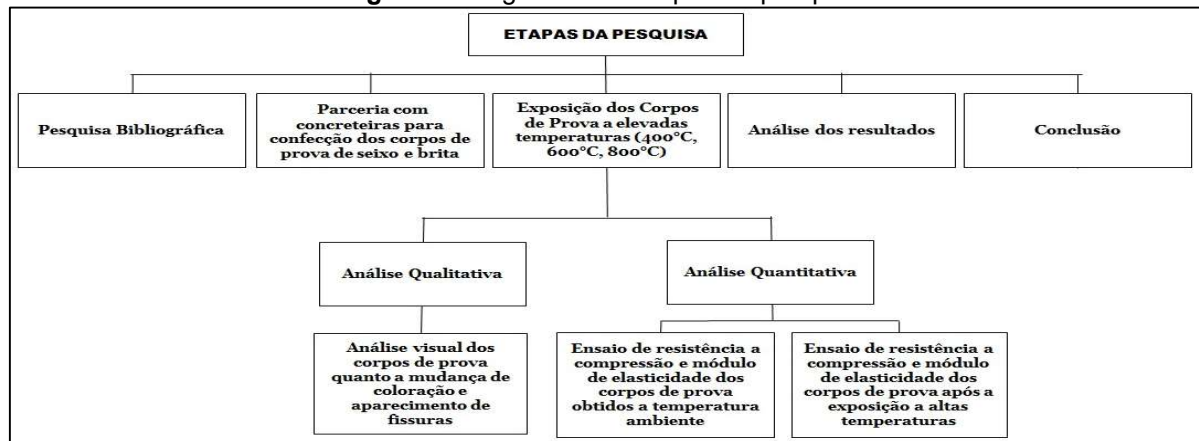
A NBR 7211:2009 classifica os agregados em grãos e miúdos, sendo os grãos, aqueles com diâmetro superior a 4,8 mm, como seixo e brita. A brita, oriunda de rochas como basalto e granito, possui superfície rugosa e forma irregular, o que favorece maior aderência à pasta de cimento, aumentando a resistência do concreto. Por outro lado, o seixo, com forma arredondada e superfície lisa, tem menor aderência, resultando em desempenho inferior (Neville, 2016).

A aderência entre a pasta de cimento e os agregados pode ser comprometida quando o concreto é exposto a altas temperaturas. A reatividade do agregado durante o aquecimento pode influenciar positivamente ou negativamente essa aderência, dependendo das transformações químicas que ocorrem. O produto resultante pode melhorar a aderência ou, ao contrário, gerar microfissuras e vazios na zona de transição entre o agregado e a pasta, como destacado por Castellote *et al.* (2003).

Os estudos sobre o impacto de diferentes tipos de agregados em condições térmicas extremas ainda são limitados, sendo a maioria dos trabalhos na área relativamente recente. Sollero *et al.* (2021), investigaram o impacto de diferentes tipos de agregados em condições térmicas extremas. Tal pesquisa demonstrou que as características mineralógicas favorecem maior resistência à expansão térmica e menor suscetibilidade a fraturas, afetando a resistência a compressão e o módulo de elasticidade do concreto. A fragilidade da zona de transição, discutida por Mehta e Monteiro (1994), também pode ser uma das causas desse comportamento. Dessa forma, a natureza mineralógica dos agregados, como sua densidade e capacidade de resistir a alterações térmicas, tem impacto direto na resistência do concreto sob altas temperaturas. Agregados mais densos e com maior módulo de deformação contribuem para maior desempenho térmico, enquanto agregados mais porosos, são mais vulneráveis aos danos causados pelo calor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação experimental teve como objetivo analisar a influência dos agregados de brita e seixo na resistência residual e no módulo de elasticidade do concreto após exposição a altas temperaturas, através de experimentos em 24 corpos de prova de concreto com fck de 30 MPa, sendo 12 com agregado de brita e 12 com agregado de seixo, avaliados em duas fases, uma qualitativa e outra quantitativa. A produção contou com a colaboração de empresas fabricantes de concreto, que forneceram os materiais de forma gratuita. Os procedimentos seguidos estão ilustrados na Figura 2 e resumidos na Tabela 2.

Figura 2: Diagrama das etapas da pesquisa

Fonte: Autora

Tabela 3: Descrição em resumo do experimento

| Nº | AMOSTRAS | QUANTIDADE | TEMPERATURA | TEMPO |
|----|----------|------------|---------------------|----------------|
| 1 | Seixo | 12 | 400°C, 600°C, 800°C | 30 min, 90 min |
| 2 | Brita | 12 | 400°C, 600°C, 800°C | 30 min, 90 min |

3.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

3.1.1 Dosagem

A dosagem dos materiais foi realizada em conformidade com os parâmetros de execução estabelecidos pela ABNT NBR 7212:201.

Os agregados miúdos (areia) utilizados nos corpos de prova de seixo e brita foram provenientes do município de Castanhal, no Estado do Pará. Esse material, extraído de cava natural quartzosa e livre de impurezas ou materiais orgânicos, possui granulometria média e atende aos requisitos da NBR 7211, conforme informações fornecidas pelas concreteiras.

Os agregados graúdos, brita 0 e 1, de origem ígnea, foram extraídos da Tabal Mineração, localizada no município de Tracuateua, também no Pará. Este agregado, de coloração cinza, é composto predominantemente por feldspato, quartzo e mica, e apresenta granulometria contínua com baixo volume de vazios.

O agregado graúdo de seixo, proveniente do município de Ourém, no Pará, foi classificado como seixo 0, apresenta granulometria contínua com baixo volume de

vazios. As misturas de concreto foram realizadas em centrais de concreto, conforme descrito abaixo. As proporções e materiais utilizados estão resumidos na Tabela 3.

- Concreto com Brita:

- Proporção: 1:2,46:1,76:0,74:0,57
- Cimento: CP II F 40
- Aditivos: 2,7 litros de aditivo multifuncional e superplastificante.

- Concreto com Seixo:

- Proporção: 1:2,43:3,36:0,59
- Cimento: CP II Z 40
- Aditivo: 2,6 litros de aditivo redutor de água 2-RA2

Tabela 4: Traço dos Concretos de Seixo e Brita, respectivamente

| MATERIAL | QUANTIDADE | MATERIAL | QUANTIDADE |
|-------------|------------|-------------|------------|
| Cimento | 315 kg | Cimento | 350 kg |
| Areia Média | 767 kg | Areia Média | 860 kg |
| Seixo 0 | 1050 kg | Brita 0 | 615 kg |
| Água | 185 L | Brita 1 | 260 kg |
| Aditivo | 2,7 L | Água | 200 L |

3.1.2 Moldagem e Cura

Os corpos de prova, fornecidos pelas concreteiras, tiveram seus processos de moldagem e cura realizados nas centrais dosadoras de concreto, conforme as normas da NBR 5738:2015. Após a moldagem, os corpos de prova foram desformados após 24 horas e armazenados em um tanque com água à temperatura ambiente por 21 dias. Decorrido esse período, os corpos de prova foram retirados da água e armazenados no laboratório, onde foram posteriormente submetidos aos ensaios.

3.1.3 Ensaio de resistência a compressão

Concluída a cura, ainda nas instalações da concreteira parceira, foram conduzidos ensaios de resistência à compressão com o objetivo de determinar a resistência de referência dos corpos de prova à temperatura ambiente, conforme especificado na NBR 5739:2018.

3.2 ENSAIOS TERMO-MECÂNICOS

3.2.1 Simulação de Incêndio

Para a simulação de incêndio foram utilizados um forno e uma estufa localizados no LEM/UFPA, conforme ilustrado na Figura 3. Devido às restrições de tempo de uso do laboratório e à necessidade de ensaiar um maior número de corpos de prova, decidiu-se utilizar a estufa e o forno simultaneamente.

Figura 3: Forno e Estufa



Fonte: Autora

Os corpos de prova foram submetidos às temperaturas de 400°C, 600°C e 800°C, com tempos de exposição de 30 e 90 minutos, e taxa de aquecimento de aproximadamente 2°C/min na estufa (para 400°C) e 4°C/min no forno (para 600°C e 800°C).

Os corpos de prova foram introduzidos no forno à temperatura ambiente. Em seguida, o equipamento foi ligado e ajustado até atingir a temperatura programada, quando então os tempos foram cronometrados. Este procedimento foi repetido para cada condição das amostras, as quais, após atingirem as temperaturas especificadas, foram removidas do forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente. A execução e os equipamentos de segurança utilizados estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4: Corpos de prova após serem aquecidos



Fonte: Autora

3.2.2 Resistência à compressão

Após serem expostos a altas temperaturas, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples conforme a ABNT NBR 5739:2018. Para corrigir eventuais imperfeições nos CPs, foram utilizados discos de Neoprene, eliminando a necessidade de capeamento. Em seguida, os corpos de prova foram rompidos na prensa hidráulica disponível no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (LEC/UFPA).

3.2.3 Módulo de Elasticidade

O módulo estático de elasticidade à compressão do concreto após a exposição a altas temperaturas foi determinado seguindo os parâmetros de execução da NBR 8522:2017. A coleta de dados foi automatizada utilizando um computador conectado à prensa. O módulo de deformação foi calculado conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 8522:2017.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE PRELIMINAR QUALITATIVA

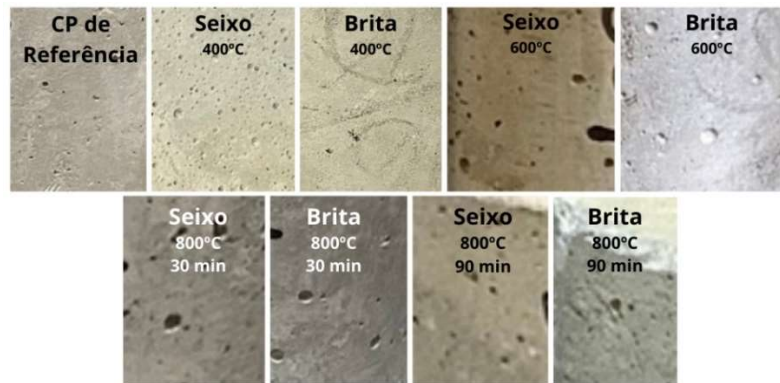
Os corpos de prova fornecidos pelas concreteiras apresentaram coloração acinzentada inicialmente. Após o aquecimento, observou-se uma mudança de coloração:

- A 400 °C, tanto os concretos de seixo quanto os de brita adquiriram um tom amarelado.
- A 600 °C, os concretos de brita ficaram cinza claro e os de seixo, alaranjados.
- A 800 °C, os concretos de brita mantiveram a coloração acinzentada após 30 minutos, mas ficaram amarelados após 90 minutos, enquanto os concretos de seixo apresentaram variações entre cinza escuro aos 30 minutos e amarelo alaranjado após 90 minutos conforme ilustrado na Figura 5.

É importante destacar que, nesta análise, a avaliação realizada é de caráter meramente visual, o que implica na possibilidade de imprecisões pois não foi utilizado nenhum equipamento específico para tal análise. Não existem parâmetros definitivos descritos na literatura que permitam associar de maneira direta uma coloração

específica a danos concretos no material, sendo essa variação apenas indicativa. Para uma análise mais aprofundada, seria necessário o uso de equipamentos apropriados que possibilitariam a correlação entre o aspecto visual e a identificação precisa de danos estruturais.

Figura 5: Corpos-de-prova antes (CP de referência) e após serem submetidos ao aquecimento



Outro aspecto observado nos corpos de prova foi a presença de fissuras conforme evidenciado na figura 6.

- A 400 °C, tanto os concretos de seixo quanto os de brita não apresentaram fissuras aparentes.
- A 600 °C, os concretos de brita apresentaram fissuras sendo mais evidenciadas a exposição de 90 minutos.
- A 800 °C, ambos os concretos de seixo e brita apresentaram fissuras, sendo nos concretos de seixo quase imperceptíveis, mas nos corpos de prova de brita foram mais aparentes apresentando a ocorrência de *spalling*.

Figura 61: Corpos de prova de brita e seixo aquecidos a 600° C e 800° C, apresentando fissuras



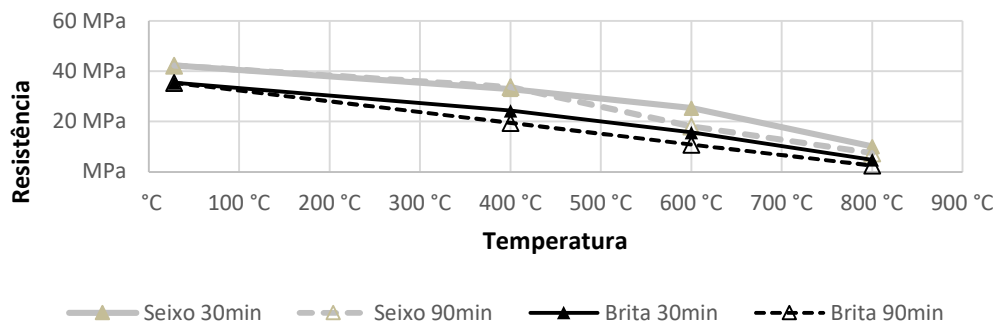
Fonte: Autora

4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA

4.2.1 Resistência à compressão

O gráfico da Figura 7 revela que, à medida que a temperatura aumenta, a resistência à compressão diminui em todos os corpos de prova, conforme esperado. É possível constatar que os corpos de prova de seixo apresentaram um comportamento similar mesmo com o prolongamento do tempo de 30 para 90 minutos até os 400°C, sendo mais afetado pelo prolongamento de tempo de exposição a partir de aproximadamente 500°C. Os corpos de prova de brita apresentaram comportamento distinto com relação ao prolongamento de tempo desde o aumento de temperatura inicial.

Figura 72: Corpos-de-prova (a) antes e (b) após de serem submetidos ao aquecimento



Fonte: Autora

A Tabela 4 apresenta a redução percentual da resistência dos corpos de prova. Os corpos de prova de seixo demonstraram bom desempenho sob altas temperaturas, mantendo cerca de 20% de sua resistência mesmo quando expostos a 800 °C. Esse resultado está em conformidade com a análise visual, que indicou apenas pequenas fissuras. Por outro lado, os corpos de prova de brita mostraram resistência nas exposições iniciais, mas à medida que a temperatura aumentou, houve uma perda significativa de sua capacidade inicial. Aos 90 minutos de exposição a 400 °C, os corpos de prova de brita perderam aproximadamente 50% de sua resistência. Já aos 90 minutos a 800 °C, essa perda foi de cerca de 93%, o que corrobora com a análise qualitativa, que identificou fissuras e *spalling* nessas temperaturas.

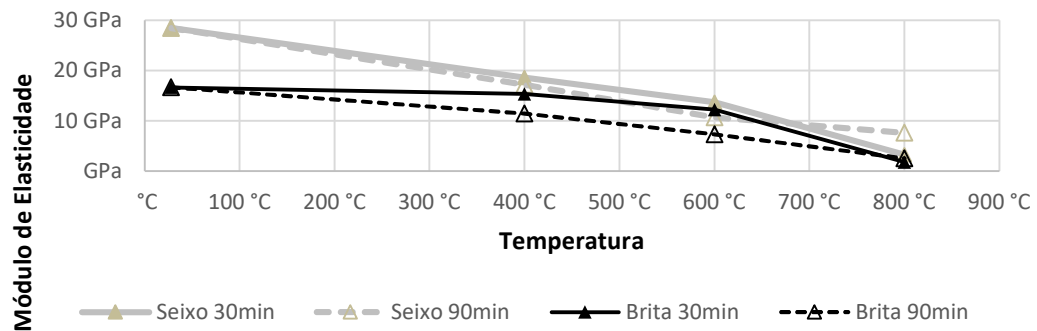
Tabela 5: Perda de resistência em % para o concreto com seixo e brita, respectivamente

| SEIXO | 30 min | 90 min | BRITA | 30 min | 90 min |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 400 °C | 22,40% | 20% | 400 °C | 31% | 45% |
| 600 °C | 40% | 57% | 600 °C | 56% | 69% |
| 800 °C | 76% | 82% | 800 °C | 86% | 93% |

4.2.2 Módulo de Elasticidade

O gráfico da Figura 8 evidencia que ambos os agregados apresentaram uma redução no módulo de elasticidade com o aumento da temperatura. Os corpos de prova de seixo demonstraram uma diminuição no módulo de elasticidade, mas mantiveram um comportamento estável, mesmo com o prolongamento do tempo de exposição até cerca de 600°C, mostrando boa resistência ao aumento do tempo. Por outro lado, os corpos de prova de brita, que inicialmente apresentaram bom desempenho com exposições mais curtas (30 minutos), passaram a ser significativamente afetados quando o tempo de exposição foi estendido para 90 minutos.

Figura 8: Corpos-de-prova (a) antes e (b) após de serem submetidos ao aquecimento



Fonte: Autora

Conforme evidenciado no gráfico, os corpos de prova de brita apresentam boa resistência a exposições mais curtas (30 minutos). Aos 400 °C, com exposição de 30 minutos, os corpos de prova de brita perdem aproximadamente 8% do seu módulo de elasticidade inicial. No entanto, ao prolongar o tempo para 90 minutos, essa perda aumenta para cerca de 30%. Esse comportamento é observado também nos percentuais apresentados na tabela 5 para 600 °C e 800 °C, em ambos os tempos de exposição. Por outro lado, os corpos de prova de seixo mostram uma perda significativa no módulo de elasticidade já nos primeiros 30 minutos de exposição, mas o aumento do tempo de exposição tem um impacto menor em comparação ao efeito da temperatura. Aos 400 °C, após 30 minutos, os corpos de prova de seixo já perderam cerca de 35% do seu módulo de elasticidade, e aos 90 minutos a perda é de 40%, apresentando uma diferença pequena de aproximadamente 5% com o prolongamento do tempo. Aos 800 °C, ambos os tipos de corpos de prova perdem cerca de 80% do seu módulo de elasticidade. Contudo, devido ao ruído experimental,

a diferença de porcentagem entre os tempos de exposição não pode ser considerada estatisticamente significativa.

Tabela 6: Perda de módulo de elasticidade em % para o concreto com seixo e brita, respectivamente

| SEIXO | 30 min | 90 min | BRITA | 30 min | 90 min |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 400 °C | 34,77% | 39,66% | 400 °C | 7,93% | 31,29% |
| 600 °C | 52,04% | 62,55% | 600 °C | 26,73% | 56,28% |
| 800 °C | 88,57% | 73,24% | 800 °C | 89,19% | 84,68% |

5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nos dois textos demonstram de forma consistente os impactos significativos das altas temperaturas no desempenho mecânico do concreto, com destaque para a perda de resistência à compressão e diminuição do módulo de elasticidade. A exposição do concreto a temperaturas elevadas resulta em transformações tanto macroscópicas quanto microestruturais, que afetam diretamente sua integridade. A análise dos corpos de prova de seixo e brita revelou diferenças claras no comportamento frente ao calor, com o seixo mostrando um desempenho mais estável, apesar da perda significativa do módulo de elasticidade já nos primeiros 30 minutos de exposição. No entanto, o aumento do tempo de exposição (de 30 para 90 minutos) teve um impacto menor em comparação à influência da temperatura, especialmente quando os corpos de prova de seixo foram expostos a 800°C, onde ambos os tipos de concreto perderam aproximadamente 80% de seu módulo de elasticidade.

Os corpos de prova de brita, por sua vez, apresentaram uma boa resistência a exposições mais curtas (30 minutos), mas foram substancialmente afetados à medida que o tempo de exposição aumentou, especialmente a 800°C, onde perderam cerca de 93% da sua resistência à compressão após 90 minutos. Essa perda é consistente com o fenômeno de spalling e a formação de fissuras, evidenciadas na análise qualitativa. Além disso, o comportamento térmico do concreto é fortemente influenciado pelas características dos agregados, como a mineralogia e a densidade, sendo os agregados mais densos, como a brita, mais suscetíveis ao impacto do aumento de temperatura.

Por fim, a comparação entre os dois tipos de agregado evidencia a importância de se considerar as propriedades específicas dos materiais na avaliação de sua resistência sob condições extremas. O conhecimento sobre as transformações térmicas e os danos que o concreto pode sofrer em incêndios é essencial para a construção de estruturas mais seguras e para a implementação de medidas adequadas de prevenção e reforço estrutural, visando minimizar os riscos de falhas catastróficas em situações de exposição a altas temperaturas.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 7212: Execução de concreto dosado em central – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

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

_____. NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

BASTOS, M. L.; VIEIRA, M. S.; DUTRA, C. F. *A responsabilidade do Estado no caso da Boate Kiss: uma análise sob o viés do direito dos desastres*. Revista da UFMG, Belo Horizonte, v. 27, n. 3, p. 130–149, 2021. DOI: 10.35699/2316-770X.2020.20982.

CASTELLOTE, M. et al. Microstructure: solid phases. In: COURSE ON EFFECT OF HEAT ON CONCRETE, Udine, Itália: International Centre for Mechanical Sciences, 2003. 13p. Apostila

Corpo de Bombeiros Militar do Pará (CBMPA). Estatísticas de Ocorrência. Disponível em: <<https://siscob.bombeiros.pa.gov.br/estatistica/index.php>> Acesso em: 02 jun. 2024.

(fib) Fédération Internationale Du Béton (2007), “Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling – State-of-art report”. Lausanne, fib. 97 p. (Bulletin d’information, 38).

- FIGUEIREDO, A. D.; COSTA, C. N.; SILVA, V. P. *Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas*. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: NUTAU/FAU-USP, 2002.
- FERNANDES, B. et al. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. *Revista IBRACON de estruturas e materiais*, v. 10, p. 838-863, 2017.
- HAGER, Izabela. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the polish academy of sciences. Technical sciences, Poland*, V. 61, n. 1, 2013.
- KODUR, V. "Properties of Concrete at Elevated Temperatures". *ISRN Civil Engineering*. Vol 2014, pp 1- 15, mar. 2014.
- LIMA, R.C.A. *Investigação do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas*. 2005. Tese (Doutorado em Construção) - PPGEC, UFRGS, Porto Alegre.
- LORENZON, A. Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas. Universidade Tecnológica Federal do Paraná: UTFPR, 2014.
- MEHTA, P. K.; e MONTEIRO, P.J.M. "Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais" – 1ª Edição – Ed. Pini, São Paulo, 1994.
- MEHTA, P. Kumar. Monteiro. PJM Concreto: estruturas, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 2008.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. São Paulo, SP. Ed. PINI, 1997.
- NEVILLE, A. M. , "Propriedades do Concreto" – 5ª Edição – Ed. Pini, São Paulo, 2016.
- SCHEIN, D.M.; WAGNER, R.; SANTA MARIA, C. S.; SEIDLER, N. *Análise das propriedades mecânicas do concreto convencional submetido a altas temperaturas*. Força, crescimento e qualidade da engenharia civil no Brasil, cap. 12 – Ponta Grossa/PR: Ed. Atena, 2020.
- SENADO FEDERAL. Lei Nº 13.425 de 30/03/2017. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/17668401>. Acesso em: 15 mar. 2024.
- SOLLERO, M. B. S.; MORENO JUNIOR, A. L.; COSTA, C. N.. Residual mechanical strength of concrete exposed to high temperatures – international standardization and influence of coarse aggregates, 2021.
- SHORT, N.R.; PURKISS, J.A.; GUISE, S.E. Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. *Construction and Building Materials*, v. 15, p. 9 - 15, February, 2001.