



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO
SUBMETIDO À ALTAS TEMPERATURAS**

EDUARDO FREITAS DE SÁ

**POMBAL – PB
2023**

EDUARDO FREITAS DE SÁ

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO SUBMETIDO À
ALTAS TEMPERATURAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza.

POMBAL – PB

2023

S111a Sá, Eduardo Freitas de.
Análise do comportamento mecânico do concreto submetido à altas temperaturas / Eduardo Freitas de Sá. – Pombal, 2023.
24 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)
– Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e
Tecnologia Agroalimentar, 2023.

“Orientação: Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza.”.
Referências.

1. Concreto. 2. Altas temperaturas. 3. Incêndio. 4. Resistência à tração. 5. Resistência à compressão. I. Souza, Leovegildo Douglas Pereira de. II. Título.

CDU 691.32 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

EDUARDO FREITAS DE SÁ

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO SUBMETIDO À
ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente Eduardo Freitas de Sá **APROVADO** em 12 de julho de 2023 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande

Registre-se e publique-se.



Assinado digitalmente por LEOVEGILDO DOUGLAS PEREIRA DE SOUZA:08419377457
CN=LEOVEGILDO DOUGLAS PEREIRA DE SOUZA:08419377457,
OU=UFCG - Universidade Federal de Campina Grande, O=IDPEdu, C=BR
Razão: Eu concordo com os termos definidos por minha assinatura neste documento
Localização: Pombal - PB
Data: 2023.07.18 09:45:21-03'00'
Foxit PDF Reader Versão: 11.2.1

Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza
(Orientador – UFCG CCTA)

Prof. Me. Rodrigo Mendes Patrício Chagas
(Membro Interno – UFCG CCTA)

Enge^a. Aline Figueirêdo da Nóbrega
(Membro Externo – UFCG CTRN)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar a vida, sem ele nada acontece, me manteve forte durante toda essa caminhada e não me deixou desistir em nenhum momento.

A minha família por todo o apoio, e em especial aos meus pais Adailton Sá e Gizélia Freitas, por não descansarem em momento algum, para que eu pudesse ter a oportunidade de me formar, sem vocês nada disso seria possível.

A minha namorada Maria Lilian, pela ajuda direta e indireta nessa jornada, por estar em todos os momentos do meu lado, tornando a tempestade mais calma, saio da universidade com duas conquistas você e o diploma.

Aos meus amigos da “CDO Engenharia”, com vocês a graduação se tornou mais fácil, juntos fizemos coisas incríveis onde sozinho nunca teríamos conseguido.

A todos os professores da UFCG campus Pombal, por compartilhar os seus conhecimentos comigo, em especial a Leovegildo, por sua dedicação e orientação para a elaboração desse trabalho.

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO CONCRETO SUBMETIDO À ALTAS TEMPERATURAS

*ANALYSIS OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF CONCRETE SUBMITTED TO HIGH
TEMPERATURES*

Eduardo Freitas de Sá, eduardo.sa@estudante.ufcg.edu.br:

Leovegildo Douglas Pereira de Souza, leovegildo.douglas@professor.ufcg.edu.br:

RESUMO

O concreto é um material formado pela mistura entre cimento, brita, água, agregado graúdo e miúdo, é de extrema importância para a construção civil, com isso sendo sempre necessário pesquisas e aprimoramentos. Uma pesquisa importante é a influência das altas temperaturas na resistência mecânica do concreto, visto que uma edificação está sempre suscetível a falhas, e algumas dessas falhas podem causar o incêndio, causando prejuízos materiais e até mesmo a perda da vida humana. O objetivo desse trabalho é a realização de um estudo para a avaliação do nível de influência que as altas temperaturas têm sobre o concreto, com relação a propriedades mecânicas de resistência à tração e compressão. As temperaturas consideradas foram: ambiente (27°C), 150°C, 300°C, 450°C, 600°C e 750°C, foram feitos corpos de prova para o ensaio de compressão e tração na flexão, totalizando 6 corpos de prova para cada nível de temperatura e ensaio, onde foi aferido que a capacidade de carga do concreto diminui com o aumento da temperatura, até um nível de 450°C a redução da resistência a compressão e a tração são próximas, porém na temperatura de 600°C a redução resistência do concreto quando comprimido é 20% maior do que quando tracionado. Foi possível identificar também o aparecimento de fissuras no objeto de ensaio, a partir da temperatura de 600°C.

Palavras-chave: Concreto. Altas temperaturas. Incêndio. Resistência à tração. Resistência à compressão.

ABSTRACT

Concrete is a material formed by the mixture of cement, gravel, water, coarse and fine aggregates. It holds tremendous importance in the construction industry, making ongoing research and improvements essential. One crucial area of study is the influence of high temperatures on the mechanical strength of concrete, considering that a structure is always susceptible to failures, and some of these failures can lead to fires, causing material losses and even loss of human life. The objective of this work is to conduct a study to evaluate the level of influence that high temperatures have on concrete, specifically in terms of mechanical properties related to tensile and compressive strength. The considered temperatures were: ambient temperature (27°C), 150°C, 300°C, 450°C, 600°C, and 750°C. Test specimens were prepared for compression and flexural tensile strength tests, resulting in six specimens for each temperature and test, amounting to a total of 6 specimens for each temperature and test. It was observed that the load-carrying capacity of the concrete decreases as the temperature increases. Up to a temperature of 450°C, the reduction in compressive and tensile strength is similar. However, at a temperature of 600°C, the reduction in compressive strength is 20% greater compared to the reduction in tensile strength. It was also possible to identify the appearance of fissures in the test specimens starting from a temperature of 600°C.

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

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos principais materiais utilizado nas construções, é formado por uma mistura de cimento, água e agregados graúdo e miúdo. Depois de dosado de maneira correta formam uma liga que pode ser moldada e assumir diferentes formatos e aplicado em diferentes situações.

O incêndio em edificações pode ser considerado um dos acidentes mais fatais em todo o mundo, sendo possível acontecer em qualquer edificação, porém a falta de prevenção aumenta as chances de acontecer tal problema. No Brasil é possível destacar alguns casos de tragédias proveniente do incêndio, no edifício Andraus (SP) foi o primeiro grande incêndio em estruturas elevadas, aconteceu em 1972 deixando 16 mortos e 336 feridos. Outro caso aconteceu no edifício Joelma (SP) acarretou 179 mortes e 320 feridos em 1974, um episódio mais recente foi no centro de treinamento do Flamengo (RJ) em 2019 que deixou 10 jovens mortos.

De acordo com Bertoline (2010),

Durante um incêndio, os danos aos materiais podem causar uma deformação estrutural ou permitir a propagação do fogo. A estabilidade de um elemento construtivo ou estrutural específico, em função do tempo de exposição ao fogo, é, portanto, uma propriedade importante tanto para os materiais estruturais como para os materiais que dividem os ambientes. Esta propriedade depende essencialmente da geometria do elemento estrutural e dos materiais que o constituem.

Segundo Bertoline (2010), quando o concreto é exposto a altas temperaturas pode apresentar fissuras, por causa das tensões ocasionadas pela deformação diferente da pasta de cimento e por existir deformações expansivas.

Conforme Helene (2023) duas potencias econômicas, os Estados Unidos e o Canadá, encaram o investimento no estudo do concreto estrutural, como um dos mais importantes investimentos na ciência e tecnologia, para a manutenção da vida de suas populações. Essas sociedades acreditam que o amplo conhecimento do concreto, acarreta um uso mais seguro e eficiente.

O concreto pode variar de acordo com o material que é utilizado como agregado, o tipo de cimento que é escolhido de acordo com o uso do concreto e na forma de misturar a matéria prima. Essas variações aumentam ano após ano, abrindo a oportunidade para os diversos estudos possíveis no concreto. O presente estudo, avalia a resistência do concreto quando sujeito a variações térmicas, a partir de ensaios laboratoriais, seguindo a normatização vigente.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O incêndio

Segundo Silva (2016), o incêndio se divide em três etapas, ignição, aquecimento (*flashover*) e resfriamento (Figura 1); o começo do incêndio é a ignição caracterizada pela sua baixa temperatura, porém esse período oferece grande risco a vida humana devido aos gases tóxicos provenientes da queima dos materiais combustíveis, essa fase é chamada de *pré-flashover*.

Ainda de acordo com Silva (2016),

Caso o incêndio não seja extinto nessa fase, haverá um aumento brusco da temperatura a partir de um instante conhecido como flashover ou instante de inflamação generalizada, que ocorre quando a superfície de toda a carga combustível presente no ambiente entra em ignição. A partir desse instante, o incêndio torna-se de grandes proporções, tomando todo o compartimento, e a

temperatura dos gases eleva-se rapidamente até todo o material combustível extinguir-se. Em seguida, haverá a redução gradativa da temperatura dos gases.

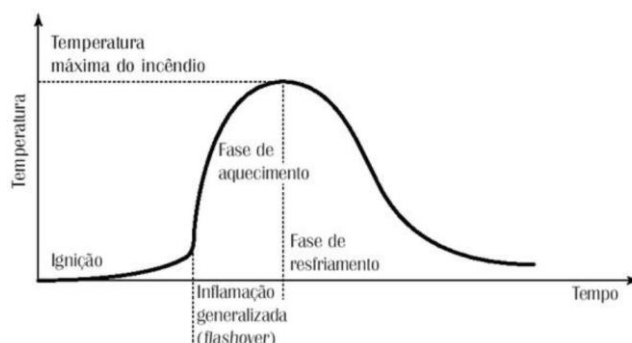


Figura 1 – Curva de incêndio real. (Fonte: Silva, 2016)

2.2 O concreto

Mehta e Monteiro (2014 apud ROCHA, 2018) expõem que “atualmente, o concreto é o material da construção mais utilizando e estima-se que seu consumo seja da ordem de 19 bilhões de toneladas métricas ao ano; este fato pode ser compreendido devido à boa resistência do concreto à água, à viabilidade de construir estruturas de diferentes formas e tamanhos, à disponibilidade de materiais para sua produção e ao seu baixo custo, quando comparados a outros materiais de mesma função.”

Segundo Neville e Brooks (2013),

Cimento Portland é o nome dado ao cimento obtido pela mistura íntima de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e materiais que contenham óxido de ferro. Essa mistura é queimada à temperatura de clínquerização, sendo o material resultante dessa queima, o clínquer, moído. As definições das normas britânicas, bem como das normas europeias e americanas são baseadas nestes princípios: nenhum material, além de gipsita (sulfato de cálcio), água e agentes de moagem, deve ser adicionado após a queima.

Pinheiro (2007) afirma que, o concreto é a mistura de cimento, água, agregado graúdo e miúdo, após o endurecimento, o concreto se caracteriza por uma boa resistência a compressão e baixa quando é solicitado na tração, é fissurado facilmente com deformações relativamente baixas, a partir disso, há a necessidade de usar o concreto com outros materiais que ajuda a combater os defeitos que ele apresenta, como por exemplo o concreto armado, que é a união do concreto com aço.

2.3 Efeito da alta temperatura no concreto

Segundo Lima *et al* (2004), no concreto uma das suas vantagens é sua elevada resistência ao fogo se for comparado a outros elementos estruturais, como por exemplo o aço, porém apresenta uma redução da capacidade estrutural, geralmente consegue resistir por um tempo considerável à ação do fogo sem que aconteça o seu colapso.

Mehta e Monteiro (2014 apud ROCHA, 2018) alegam que “O comportamento do concreto exposto a elevadas temperaturas está relacionado a vários fatores que agem simultaneamente, como a composição do concreto que influencia no seu comportamento, quando submetido ao fogo, pois a pasta de cimento e o agregado se decompõem com o calor, e o desenvolvimento de pressões internas geradas pela decomposição gasosa que é decorrente da permeabilidade do concreto, do tamanho do elemento e da taxa de aumento da temperatura.”

Mehta e Monteiro (1994 apud LIMA *et al*, 2004) dizem que “sabe-se que a composição do concreto é um dos fatores que deve ser levado em consideração, uma vez

que tanto a pasta de cimento quanto o agregado são constituídos de componentes que se alteram e se decompõem, em maior ou menor grau, com a exposição ao calor. A umidade inicial, o tamanho da peça e a taxa de crescimento da temperatura também são fatores influentes, uma vez que governam o desenvolvimento das pressões internas dos produtos gasosos de decomposição.”

Conforme mencionado por Neville (2016),

A resistência à compressão do concreto varia com a situação de exposição a altas temperaturas, por exemplo, no caso de um incêndio, a exposição a elevadas temperaturas ocorre por um período curto, mas a massa do concreto fica sujeita a um imenso fluxo de calor, enquanto no corte de concreto por lança térmica, a exposição é de poucos segundos e o fluxo de calor aplicado é pequeno.

O Quadro 1, produzido por Carvalho (2001), mostra os efeitos causados no concreto quando é submetido a determinada temperatura.

Característica	Efeito	Causa
Dureza superficial	Fissuração, fragmentação, fragilização	Desidratação a 100°C, remove a água livre; a desidratação se completa em 540°C; $Ca(OH)_2 \rightarrow CaO$ em 450 a 500°C a pasta primeiro expande, depois retrai.
Fissuração	Fissuração superficial a 290°C; Fissuração profunda a 540°C	Perpendicular à face, e interna; pode assemelhar-se a fissuras de retração
Mudança de cor (sem lascamento)	Cor normal até 230°C Avermelhada de 290 a 590°C Vermelho/cinza de 590 a 900°C Cinza/camurça acima de 900°C O calcário se torna branco	Rochas sedimentares e metamórficas podem incorporar calor de forma estável em temperaturas baixas, tornam-se instáveis em maiores temperaturas e mostram permanente mudança de cor sob aquecimento.
Comportamento do agregado	Lascamento explosivo para concretos com alto teor de agregados silicosos próximos à superfície, acima de 573°C	Agregados diferem em difusibilidade, condutividade, coeficiente de dilatação; a transmissão de calor decresce para concretos feitos com agregados altamente silicosos, areia basáltica, calcário, agregados leves. Baixo quartzo inverte para alto quartzo em 573°C com expansão de 0,85% do volume.
Lascamento	Ocorre paralelamente à superfície livre seguido por quebra em lascas finas nos cantos e quinas (assemelhase à esfoliação)	Redução da resistência

Quadro 1 – Efeitos do fogo sobre as características do concreto. (Fonte: Carvalho, 2001)

Rosso (1975 apud MORALES, CAMPOS E FAGNELLO, 2011) afirma que “a partir da temperatura básica teórica de 300°C, começam a ocorrer prejuízos consideráveis na resistência mecânica do concreto.”

É possível concluir que a resistência do concreto decresce com o aumento da temperatura, a Figura 2 apresenta a influência desse aumento no fator de redução da capacidade resistiva do concreto para agregados silicosos e calcários.

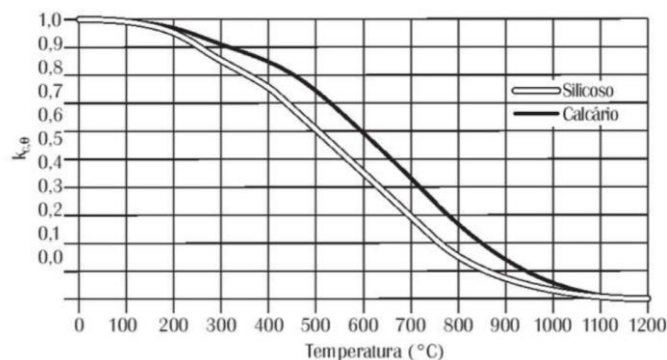


Figura 2 – Fator de redução da resistência dos concretos silicoso e calcário em função da temperatura (Fonte: Silva, 2016)

A Figura 3 apresenta o decaimento da resistência a compressão e do módulo de elasticidade de acordo com o aumento térmico.

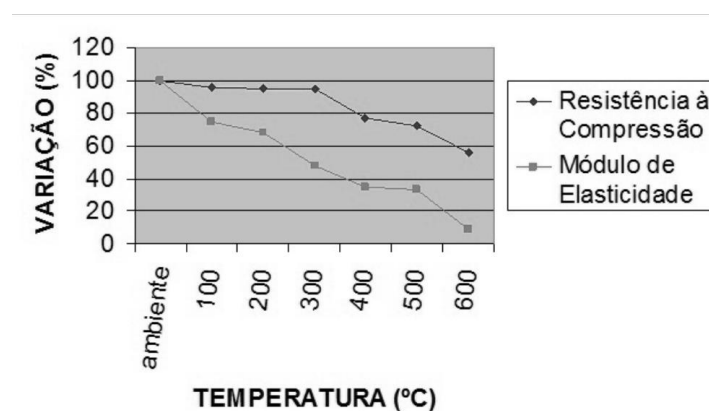


Figura 3 – Variação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em função da elevação da temperatura (Fonte: Morales, Campos e Fagnello, 2011)

2.4 Estado da arte

Silva (2009), realizou um estudo aplicando ao concreto cinco níveis de temperatura com o intuito de avaliar as características, resfriando naturalmente, diante dos resultados obtidos foi verificado que a resistência a compressão entre as temperaturas de 400°C e 900°C tiveram redução maior que 50% e a partir de 900°C as resistências encontradas foram praticamente nulas.

Posteriormente, Souza e Moreno Jr (2010), estudaram o comportamento do concreto quando submetido a altas temperaturas, no trabalho em questão as temperaturas escolhidas foram de 300°C, 600°C e 900°C, sendo avaliado os impactos e alterações na resistência à compressão, resistência à tração e seu módulo de deformação, observa-se no estudo que quando os corpos de prova são expostos a uma temperatura próxima a 900°C valores de resistência a compressão e a tração se aproximaram de zero.

Costa (2011) também executou uma pesquisa quanto as manifestações patológicas nas estruturas de concreto sujeitas a alta temperatura, nele verifica-se que mesmo diante de exposições por período considerável não ocorre um colapso total, apesar de ficar fragilizada.

Subsequente, Silva (2013), realizou uma análise que buscou analisar o comportamento do concreto de resistência normal e de alta resistência, foi examinado também a influência da incorporação de fibras de PET na perda de resistência quando

esses foram expostos a alta temperatura, também foi verificado que o concreto sofre perda de resistência quanto maior for a temperatura, porém com a presença de PET a influência da temperatura foi menos brusca.

Uma análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperatura foi desenvolvido por Lorenzon (2014), neste foi conseguido uma apuração semelhante aos demais expostos anteriormente, onde em 300°C aconteceu uma perda de 10% chegando a 87% de redução a 800°C.

Wagner *et al* (2021), examinou o comportamento em situação de incêndio em diferentes tipos de cimentos, verificou-se que o CP-V quando a temperatura chega a 500°C não ocorreu diferenças significativas na resistência a compressão, quando utilizado no CP-VI e CP-II tiveram uma grande redução nos intervalos de 300°C e 500°C.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 O concreto

O concreto utilizado nesse artigo é composto por areia média, brita 0 (Diâmetro de 4,75 mm a 9,5 mm), obtidos na cidade de Pombal/PB e o cimento CP V ARI da marca Montes Claros fabricado pela CSN Cimentos da cidade de Patos/PB.

As propriedades físicas dos agregados miúdos e graúdos foram determinadas por ensaios de acordo com as normas ABNT: NBR 7181/2016 – Solo – Análise granulométrica, NBR 16916/2021 – Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água, NBR 16917/2021 – Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água, NBR 16972/2021 – Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Os resultados desses ensaios são exibidos na Tabela 1 e Figura 4 e Figura 5.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos agregados

Agregado	Massa Específica (γ – kg/m ³)	Massa Unitária (μ – kg/m ³)
Miúdo (Areia média)	2109,25	1529,16
Graúdo (Brita 0)	2544,55	1508,02

Fonte: O autor, 2023

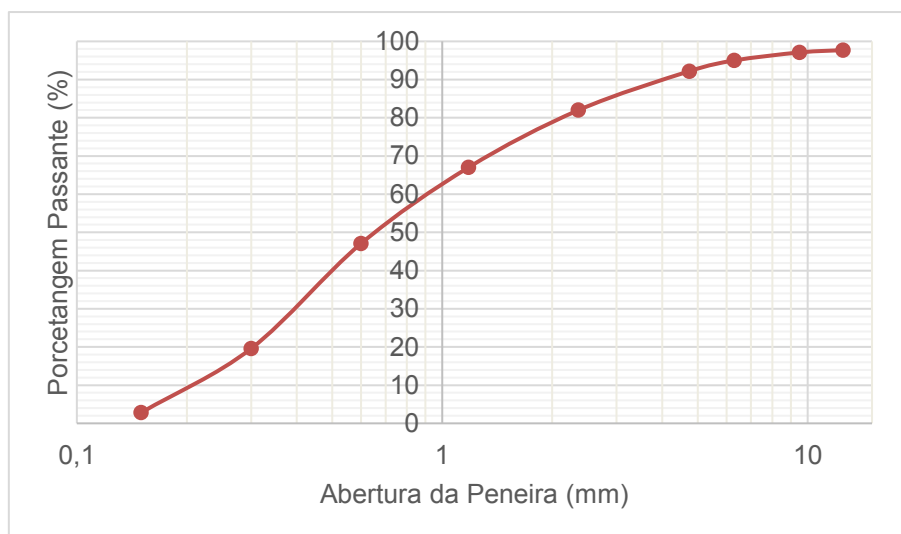


Figura 4 – Granulometria da areia média (Fonte: O Autor, 2023)



Figura 5 – Granulometria da Brita 0 (Fonte: O Autor, 2023)

A proporção de cada componente presente no concreto foi determinada a partir do método de dosagem ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), esse método utiliza as propriedades físicas dos agregados e do cimento, com um valor de resistência do concreto escolhido previamente para determinar a proporção de cada material. Para o concreto utilizado nesse estudo foi definido uma resistência característica (f_{ck}) de 30 Mpa, sendo assim o traço em massa resultante desse método foi 1 : 1,6 : 1,9 : 0,53 (Cimento : Areia : Brita : Água).

3.2 Corpos de prova

Foram fabricados corpos de prova cilíndrico para analisar o comportamento da compressão e prismáticos para a tração. Para obter um resultado mais confiável foram definidos 6 corpos de prova para cada nível de temperatura, serão 6 níveis, logo foram produzidos 36 corpos de prova cilíndricos e 36 prismáticos.

O molde cilíndrico utilizado tem dimensão de 5x10cm e o prismático 4x4x16cm, ambos em material metálico. O procedimento de moldagem começou com a preparação dos moldes, a princípio foi passado óleo mineral nas faces internas dos moldes para que facilitasse a desmoldagem, posteriormente foi misturado o concreto pesando cada material de acordo com o traço definido previamente, com o concreto pronto foi colocado nos moldes, e o adensamento foi feito manualmente e de maneira uniforme.

Após 24 horas os corpos de prova foram retirados dos moldes (Figura 6 e Figura 7) e imersos em um tanque com água por 28 dias (Figura 8) para a cura total do composto, finalizado essa etapa eles são removidos do tanque e armazenados para a secagem natural por uma semana, para a evaporação de toda a umidade em excesso.



Figura 6 – Corpos de prova cilíndricos (Fonte: O autor, 2023)



Figura 7 – Corpos de prova prismáticos (Fonte: O autor, 2023)



Figura 8 – Tanque de cura (Fonte: O autor, 2023)

3.3 Aquecimento

Nesse estudo foi analisado a resistência a tração e compressão do concreto em 6 níveis de temperatura: ambiente ($\pm 27^{\circ}\text{C}$), 150°C , 300°C , 450°C , 600°C e 750°C , conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Ensaio realizados

Ensaio		
Tração	Compressão	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
CP's		
6	6	27
6	6	150
6	6	300
6	6	450
6	6	600
6	6	750

Fonte: O autor, 2023

Para submeter o concreto a essas temperaturas foi utilizado o forno mufla da SolidSteel (Figura 9) que tem uma variação de 100°C a 1200°C . A Figura 10 exibe a curva de aquecimento da mufla em questão, nela é possível observar que a taxa de aquecimento média é $11^{\circ}\text{C}/\text{min}$, porém é relativamente alta no início do aquecimento e vai diminuindo gradativamente com o aumento da temperatura.



Figura 9 – Forno mufla (Fonte: O autor, 2023)

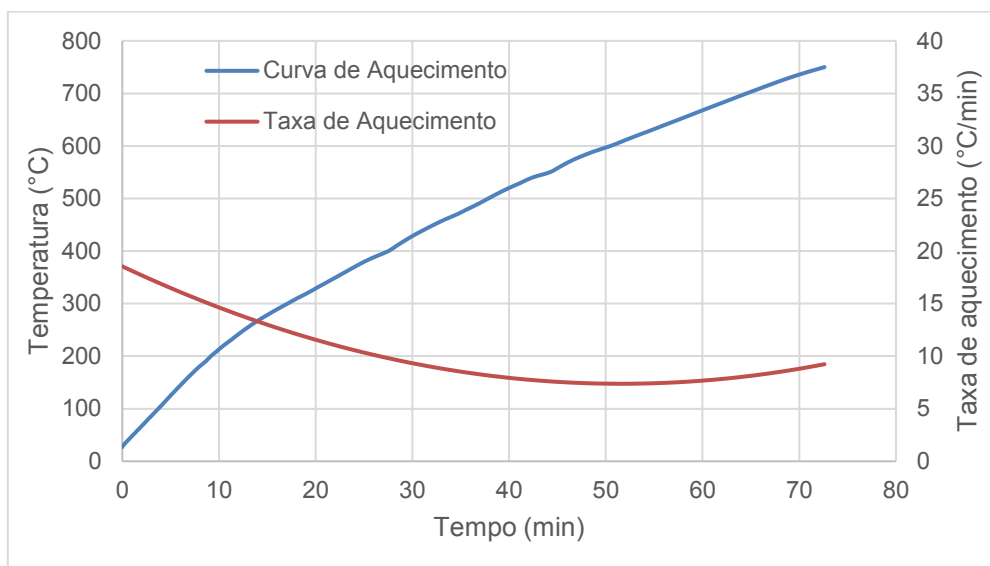


Figura 10 – Curva de aquecimento da mufla (Fonte: O autor, 2023)

Com o processo de fabricação dos corpos de prova devidamente finalizado, eles foram colocados na mufla e submetido a sua temperatura especifica (Figura 11), após o equipamento atingir a temperatura escolhida (Figura 12) onde o “SP” representa a temperatura escolhida e o “PV” a temperatura interna da mufla, posteriormente é cronometrado uma hora, na qual os corpos de prova ficaram expostos constantemente a uma mesma temperatura; finalizado o tempo a mufla foi desligada e aguardado o resfriamento natural, para que não ocorram choques térmicos nos objetos de ensaio.



Figura 11 – Corpos de prova na mufla (Fonte: O autor, 2023)



Figura 12 – Painel da mufla (Fonte: O autor, 2023)

Após o aquecimento, os corpos de prova estão prontos para iniciarem os ensaios, porém ainda é preciso realizar o capeamento nos corpos de prova cilíndricos, para a execução perfeita do ensaio de compressão.

Nesse procedimento foi utilizado uma folha A4 molhada em uma bancada plana, ela serve de superfície pra receber a pasta de cimento que foi desenvolvida com um traço de 1 : 2,5 (Água: Cimento), com essa pasta na folha foi colocado a face irregular dos corpos de prova cilíndricos, a camada ficou com uma espessura de no máximo 3 mm, foi aguardado 3 dias para a cura dessa pasta e conseqüentemente ganho de resistência, pois precisa ter resistência maior do que o concreto ensaiado, para não interferir no resultado.

O capeamento é necessário para regular a superfície de contato dos corpos de prova cilíndrico, naturalmente ele tem uma superfície irregular devido ao seu processo de fabricação, porém em alguns corpos de prova, foi necessário o capeamento das duas faces, devido a irregularidades de alguns moldes, como exibido na Figura 13.



Figura 13 – Capeamento dos corpos de prova (Fonte: O autor, 2023)

3.4 Ensaios

Para a realização dos ensaios foi utilizado a prensa hidráulica da Fortest (Figura 14) modelo FT 02, com capacidade para 200 toneladas. Foi utilizado também junto com a

prepara os dispositivos de carga, para o ensaio de compressão (Figura 15) e o ensaio de tração na flexão (Figura 16). A execução do ensaio prosseguiu-se assim como exibe a Figura 17 para o ensaio de compressão e a Figura 18 para o ensaio de tração na flexão.



Figura 14 – Prensa manual (Fonte: O autor, 2023)

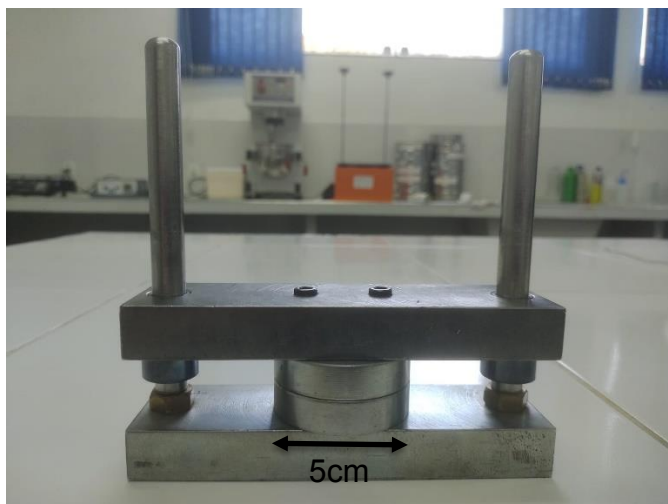


Figura 15 – Dispositivo de carga para compressão (Fonte: O autor, 2023)

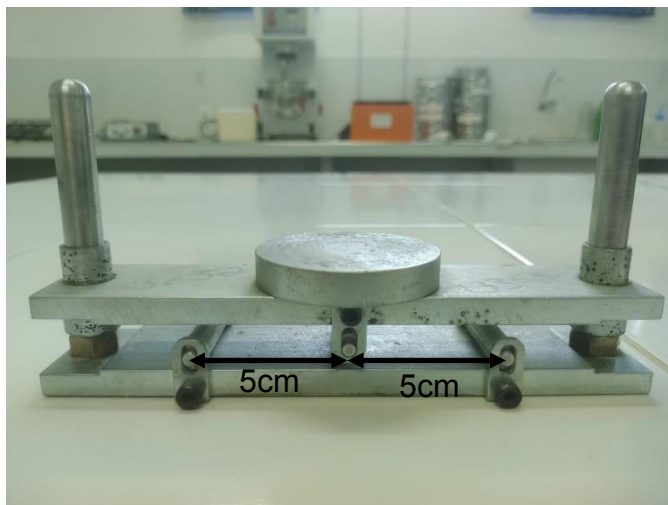


Figura 16 – Dispositivo de carga para tração na flexão (Fonte: O autor, 2023)



Figura 17 – Execução de ensaio de compressão (Fonte: O autor, 2023)



Figura 18 – Execução do ensaio de tração na flexão (Fonte: O autor, 2023)

Os corpos de prova cilíndricos foram ensaiados à compressão e os prismáticos à tração na flexão. O ensaio se dá pela aplicação de uma força no centro de carga do objeto ensaiado até a sua ruptura, utilizando os dispositivos de carga específico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos após os ensaios de resistência mecânica são exibidos na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 – Ensaio de compressão

Temperatura (°C)	Esforços de ruptura (tf)						Média
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	
27	7,61	7,15	9,37	8,24	5,06	8,2	7,61
150	6,94	4,52	7,15	9,03	6,53	5,69	6,64
300	6,27	3,97	7,53	6,53	7,07	6,82	6,37
450	5,8	5,44	5,56	5,44	6,11	5,23	5,6
600	2,93	2,8	2,97	2,8	2,43	3,43	2,89
750	2,22	2,55	2,38	1,8	2,68	2,38	2,34

Fonte: O autor, 2023

Tabela 4 – Ensaio de tração na flexão

Temperatura (°C)	Esforços de ruptura (tf)						Média
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	
27	0,54	0,59	0,54	0,59	0,59	0,59	0,57
150	0,59	0,5	0,54	0,54	0,5	0,5	0,53
300	0,5	0,46	0,42	0,42	0,42	0,46	0,45
450	0,38	0,38	0,38	0,42	0,42	0,42	0,4
600	0,38	0,33	0,33	0,29	0,33	0,33	0,33
750	0,29	0,33	0,33	0,33	0,29	0,29	0,31

Fonte: O autor, 2023

A partir dos dados obtidos, é possível encontrar a tensão de ruptura dos corpos de prova. Para a compressão, tensão é a razão entre a força e a área que ela é aplicada, sendo assim os valores de tensão foram obtidos utilizando a Equação 1, resultados conforme a Tabela 5, a Figura 19 exhibe como as variáveis temperatura e tensão interagem entre si.

$$\sigma (MPa) = \frac{F (N)}{A (mm^2)} \quad (1)$$

Tabela 5 – Tensão à compressão

Temperatura (°C)	Esforço médio (tf)	Tensão média (Mpa)	Redução percentual (%)
27	7,61	38,02	0%
150	6,64	33,17	13%
300	6,37	31,83	16%
450	5,6	27,98	26%
600	2,89	14,44	62%
750	2,34	11,69	69%

Fonte: O autor, 2023

Os resultados obtidos na compressão tiveram percentual de redução semelhantes aos observados por Wagner (2021), como por exemplo, para a temperatura de 300°C teve uma redução de 17,60%.

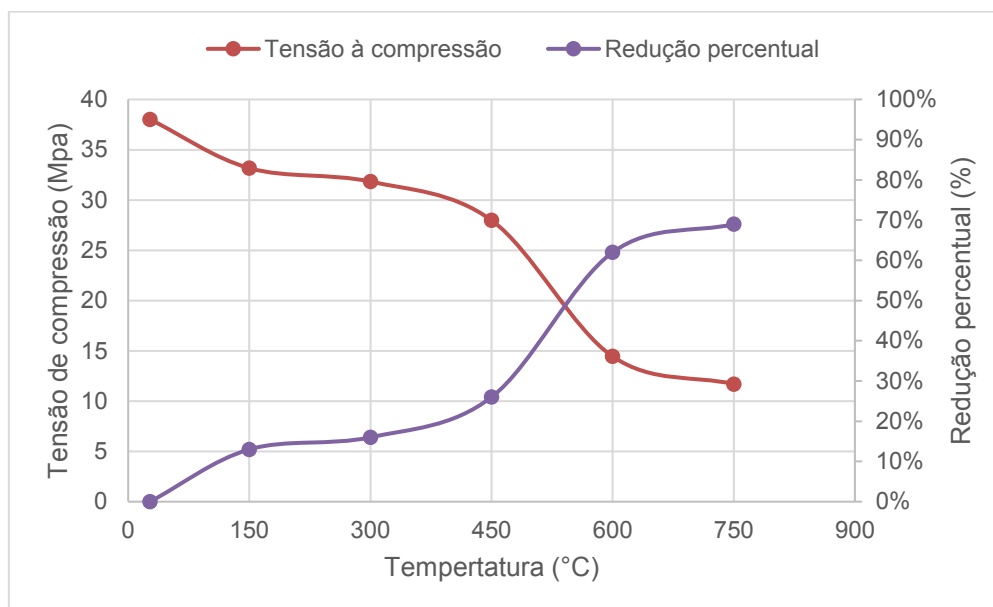


Figura 19 – Curva de tensão de compressão por temperatura (Fonte: O autor, 2023)

A partir da curva exibida na Figura 19, é possível afirmar que a temperatura é inversamente proporcional a resistência do concreto, ou seja, quanto maior a temperatura menor será a resistência, verifica-se que entre a temperatura de 450°C e 600°C houve uma queda da resistência mais acentuada.

Ademais, para o ensaio de flexão, a tensão de ruptura é encontrada pelo produto do momento fletor máximo da peça pela distância da linha neutra até a extremidade, tudo dividido pelo momento de inércia da seção, como expresso na Equação 2. Os resultados se encontram na Tabela 6 e a curva de interação da tensão por temperatura é apresentada na Figura 2020.

$$\sigma (Mpa) = \frac{M (Nmm) \cdot y(mm)}{I (mm^4)} \quad (2)$$

Tabela 6 – Tensão à tração na flexão

Temperatura (°C)	Esforço médio (tf)	Tensão média (Mpa)	Redução percentual (%)
27	0,57	13,11	0%
150	0,53	12,19	7%
300	0,45	10,35	21%
450	0,4	9,2	30%
600	0,33	7,59	42%
750	0,31	7,13	46%

Fonte: O autor, 2023

Os resultados observados por Souza e Moreno Jr (2010) quando colocaram o concreto em altas temperaturas foram semelhantes aos encontrados nesse estudo, como por exemplo à 600°C, tendo uma redução percentual de 43%.

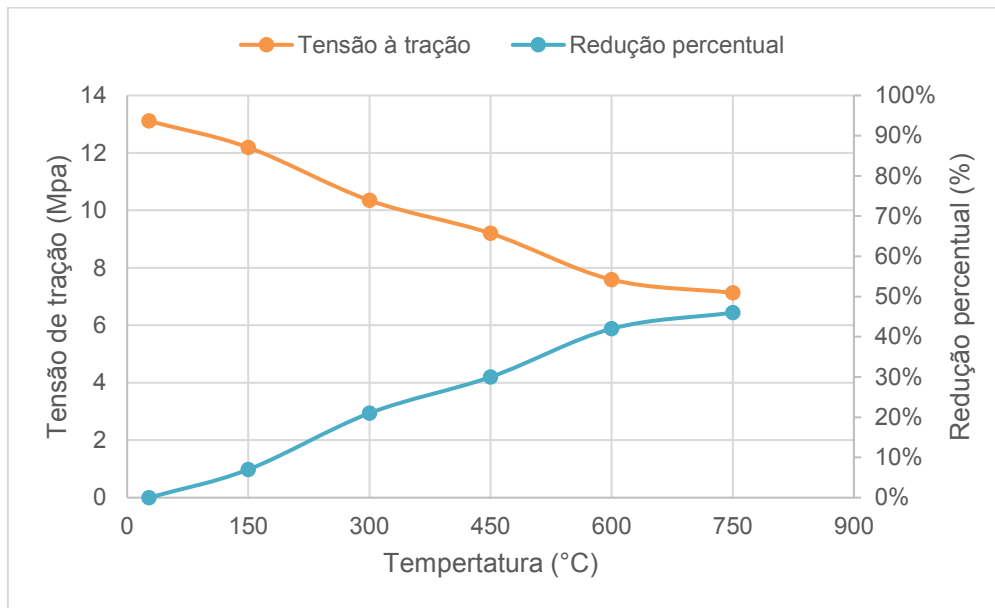


Figura 20 – Curva de tensão de tração por temperatura (Fonte: O autor, 2023)

Assim como no ensaio de compressão a resistência à tração continua caindo com o aumento da temperatura, conforme a Figura 20, mas nesse caso a resistência à tração decresce de maneira constante, onde sua curva está mais próxima de uma reta.

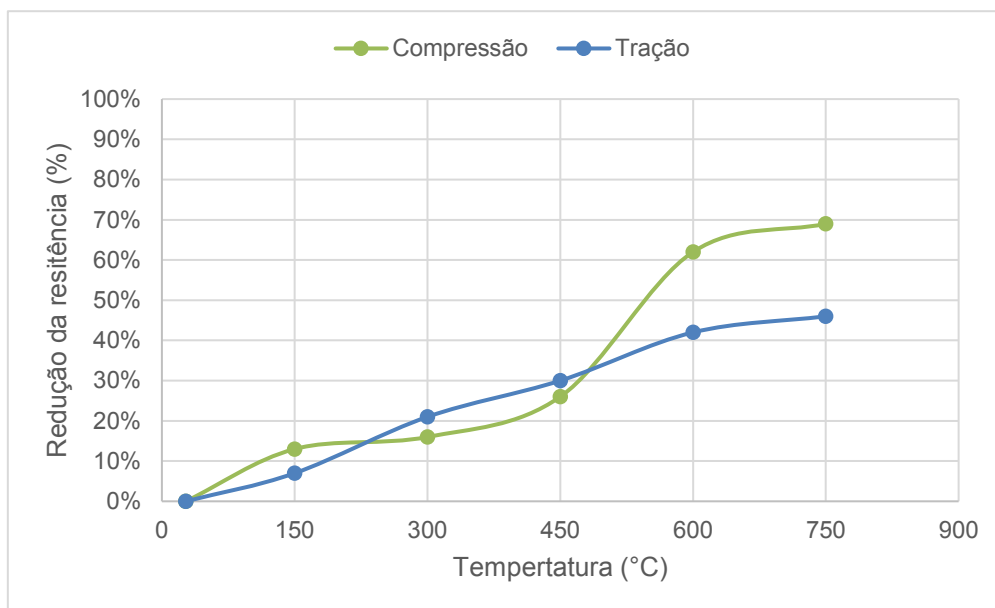


Figura 21 – Redução percentual da resistência (Fonte: O autor, 2023)

A Figura 21 exibe a comparação da redução percentual da resistência à tração e a compressão dos corpos de prova, até uma temperatura de 450°C a redução linearmente para os dois casos, porém no nível de 600°C a resistência à tração apresenta uma maior conservação, quando comparado à compressão, que apresenta 20% a mais de perda da sua capacidade de resistir.

Outro ponto que foi observado é a questão da fissuração do concreto. A Figura 22 e a Figura 23 apresenta a evolução das fissurações, até a temperatura de 450°C nenhuma fissura é encontrada a olho nu; a partir do nível de 600°C as fissuras aparecem e tomam todo volume do concreto.

Carvalho (2001), quando estudou o comportamento do concreto em situação de incêndio verificou o mesmo comportamento em relação a fissura encontrada nesse estudo (Quadro 1).



Figura 22 – Superfícies dos corpos de prova (Fonte: O autor, 2023)

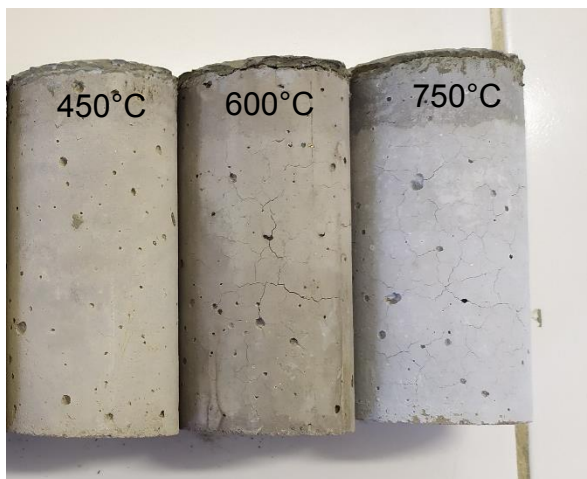


Figura 23 – Superfícies dos corpos de prova (Continuação) (Fonte: O autor, 2023)

5. CONCLUSÕES

Os dados expostos anteriormente evidenciam que o concreto é um material que é afetado negativamente pelo aumento de temperatura, tanto com o aparecimento de fissurações, quanto na diminuição da capacidade de resistir a um esforço.

O concreto se comporta de maneira diferente de acordo com a solitação, resiste bem à compressão e mal na tração, porém a capacidade de resistir a compressão é mais afetada pelo aumento da temperatura, a um nível de 600°C a redução da resistência à compressão é 20% maior do que a tração, para conhecer o causador dessa diferença é preciso fazer mais estudos, como avaliar a influência dos materiais, por exemplo: os tipos de cimento, areia ou brita, é preciso também analisar a influência da dosagem de cada material. entretanto à 450°C ambas matem 70% da sua resistência.

As fissuras começam a aparecer a partir de 600°C, essas fissuras tornam o concreto mais vulnerável, pois abre espaço para entrada de umidade, como também o aumento de vazios no maciço. No caso prático na utilização do concreto armado, essas manifestações expõem a ferragem ao ambiente externo, causando oxidação no aço, e consequentemente enfraquecendo a estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água**, NBR 16916:2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Agregado graúdo — Determinação da densidade e da absorção de água**, NBR 16917:2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Agregados — Determinação da massa unitária e índice de vazios**, NBR 16972:2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, **Solo — Análise granulométrica**, NBR 7181:2016.

BERTOLINE, Luca. **Materiais de construção**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CARVALHO, Espedito Felipe Teixeira. **Contribuição ao estudo da resistência residual do concreto submetido ao tratamento térmico padrão para situações de incêndio**. 2001. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

COSTA, Paulo Roberto Silva. **Manifestações patológicas nas estruturas de concreto sujeitas a altas temperaturas**. 2011. 42 p. Monografia (Especialização em construção civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Rio de Janeiro, 2011.

COUTO, José Antônio Santos; CARMINATTI, Rafael Lima; NUNES, Rogério Reginato Alves; MOURA, Ruan Carlos A. O concreto como material de construção. **Caderno de graduação: Ciências exatas e tecnológicas**, Sergipe, v. 1, n. 17, p. 49-58, 2013.

HELENE, Paulo. **4ª Grande revolução na arte de projetar e construir estruturas**. [S. l.], Disponível em: http://www.ibracon.org.br/news/index_arte.htm. Acesso em: 10 jun. 2023.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D.; CASONATO, C. A.; SILVA FILHO, L. C. P. Efeito de altas temperaturas no concreto. In: Seminário de Patologias das Edificações, 2., 2004, Porto Alegre.

LORENZON, Andressa. **Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas**. 2014. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2013.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007.

ROCHA, Rochanna Alves. Efeito da alta temperatura em concretos: uma revisão da literatura. **InterScientia**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 211-227, 2018.

SILVA, Daiane dos Santos. **Propriedades mecânicas residuais após incêndio de concretos usados na construção civil na grande Florianópolis**. 2009. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SILVA, Janaina Salustio. **Estudo de concretos de diferentes resistências à submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET)**. 2013. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SILVA, Valdir Pignatta. **Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

SOUZA, Adriana Aparecida Ambrosio. **Influência do tipo de agregado nas propriedades mecânicas do concreto submetido ao fogo**. 2005. 169 p. Dissertação (Mestrado em Concentração em Edificações) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SOUZA, Pedro Henrique França Silva Lopes. **O uso do concreto armado na interação entre arquitetura e estrutura: análise de casos brasileiros**. 2016. 98 p. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2016.

SOUZA, A. A. A.; MORENO JR, A. L. Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 432-448, 2010.

WAGNER, R.; SCHEIN, D. M.; SANTA MARIA, C. S.; SEIDLER, N. Estudo do comportamento do concreto em situações de incêndio. **Ingenio**, Santo Ângelo, v. 3, n. 1, p. 19-29, 2021.