



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MODELO CONSTITUTIVO DE DANO ELASTOPLÁSTICO PARA CONCRETO SUBMETIDO À ALTAS TEMPERATURAS SOB EFEITO DE TRAÇÃO

Waleria Torres da Silva¹, Leovegildo Douglas Pereira de Souza²

RESUMO

O concreto é um dos materiais fundamentais na construção civil devido às suas características de desempenho, custo e mão de obra qualificada. Em virtude da ampla utilização desse material, é imprescindível realizar pesquisas contínuas para aprimorar o entendimento de suas propriedades. Este estudo visa avaliar o impacto de altas temperaturas na resistência mecânica do concreto, focando nas propriedades de tração por compressão diametral e tração na flexão. Foram conduzidos ensaios em corpos de prova expostos a temperaturas crescentes, variando desde a temperatura ambiente até 900°C. Os resultados mostraram uma queda na resistência do concreto à medida que a temperatura aumenta. Até 450°C, a redução da resistência de ambos os ensaios foi semelhante, contudo, a tração por compressão diametral teve maior redução que a tração na flexão. Também se observa que, a partir de 600°C, houve uma maior redução na resistência mecânica do concreto, indicando uma deterioração em temperaturas mais elevadas. Desse modo, os resultados ressaltam a necessidade de considerar os efeitos das altas temperaturas no comportamento do concreto, especialmente no que diz respeito às suas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Resistência mecânica. Deterioração. Comportamento. Impacto.

¹ Aluna de Engenharia Civil, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, UFCG, Pombal, PB, e-mail: waleria.torres@estudante.ufcg.edu.br

² Doutor em Engenharia, Professor adjunto II, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, UFCG, Pombal, PB, e-mail: leovegildo.douglas@professor.ufcg.edu.br

EXPERIMENTAL EVALUATION OF A CONSTITUTIVE MODEL OF ELASTOPLASTIC DAMAGE FOR CONCRETE SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURES UNDER THE EFFECT OF TENSION

ABSTRACT

Concrete is one of the fundamental materials in civil construction due to its performance characteristics, cost and qualified labor. Due to the wide use of this material, it is essential to carry out continuous research to improve the understanding of its properties. This study aims to evaluate the impact of high temperatures on the mechanical strength of concrete, focusing on the diametrical compression tensile and flexural tensile properties. Tests were conducted on specimens exposed to increasing temperatures, ranging from room temperature to 900°C. The results showed a drop in concrete strength as the temperature increases. Up to 450°C, the reduction in resistance in both tests was similar, however, the traction due to diametral compression had a greater reduction than the traction in flexion. It is also observed that, from 600°C onwards, there was a greater reduction in the mechanical strength of the concrete, indicating a deterioration at higher temperatures. Thus, the results highlight the need to consider the effects of high temperatures on the behavior of concrete, especially with regard to its mechanical properties.

Keywords: Mechanical resistance. Deterioration. Behavior. Impact.

INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo na área da construção civil, posição justificada por características únicas nos quesitos desempenho, preço e mão de obra qualificada. No entanto, quando exposto a altas temperaturas, suas características mecânicas sofrem danos consideráveis, o que pode resultar em falhas estruturais durante incêndios ou exposição a intensas temperaturas.

Conforme discutido por Neville (1997), o concreto apresenta um bom desempenho quando submetido ao fogo, uma vez que não libera gases tóxicos durante o processo de aquecimento. Além disso, o concreto demonstra uma resistência ao calor considerável, mantendo suas propriedades por um período prolongado. Porém, com o aumento da temperatura nos elementos do concreto, é provocada uma redução no módulo de elasticidade e na resistência características de seus materiais constituintes, havendo prejuízos na rigidez do elemento (COSTA, 2011).

A variação térmica é responsável por alterar as propriedades de resistência mecânica e deformação dos elementos estruturais de concreto. A desagregação do concreto devido às altas temperaturas frequentemente se manifesta como fissuras, um fenômeno conhecido como *spalling*, que é o deslocamento do concreto. Este efeito é caracterizado pela perda das camadas superficiais do concreto, o que compromete sua resistência e expõe a armadura ao fogo, podendo causar o colapso da estrutura (CASTRO, et al., 2011).

O conhecimento acerca da ação de elevadas temperaturas em elementos estruturais de concreto é de relevante importância e vem ganhando cada vez mais atenção do meio acadêmico. É indispensável considerar os impactos na resistência à tração do material, pois é uma característica essencial para a integridade estrutural, especialmente em elementos submetidos a cargas de tração, como vigas e lajes.

Durante a exposição ao fogo, a redução na resistência à tração do concreto pode comprometer a capacidade da estrutura de suportar cargas de tração, aumentando o risco de falhas catastróficas. Além disso, a diminuição na resistência à tração pode levar a um aumento na propagação de fissuras, intensificando ainda mais os danos causados pelo calor. A compreensão do comportamento mecânico do concreto submetido a altas temperaturas é essencial para o desenvolvimento de

estratégias de projeto e mitigação de riscos em estruturas expostas a esse tipo de condição.

Os ensaios de tração por compressão diametral e tração na flexão são métodos amplamente utilizados para avaliar as propriedades mecânicas do concreto. Eles nos fornecem informações sobre a resistência à tração, o módulo de elasticidade e as mudanças na estrutura do concreto.

Nesse contexto, o presente estudo se concentra na avaliação experimental do comportamento do concreto submetido a altas temperaturas sob efeito de tração, utilizando ensaios de tração por compressão diametral e tração na flexão.

Esta pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento nessa área por meio da realização de ensaios experimentais em corpos de prova de concreto submetidos a diferentes temperaturas e carregamentos de tração. Assim, os resultados experimentais serão analisados para investigar a redução da resistência do concreto em diferentes níveis de temperatura.

MATERIAIS E MÉTODOS

Dosagem do concreto e determinação das propriedades físicas

Na fase inicial, foram estabelecidas as propriedades e características físicas dos materiais, bem como as especificações do concreto correspondente.

Na dosagem do concreto, empregou-se um método experimental que envolveu a análise da granulometria dos agregados, sua compactação adequada, seguida da proporção de cimento para agregados, de modo a produzir concreto com resistência normal aproximada de $f_{ck} \approx 30$ MPa.

Agregados

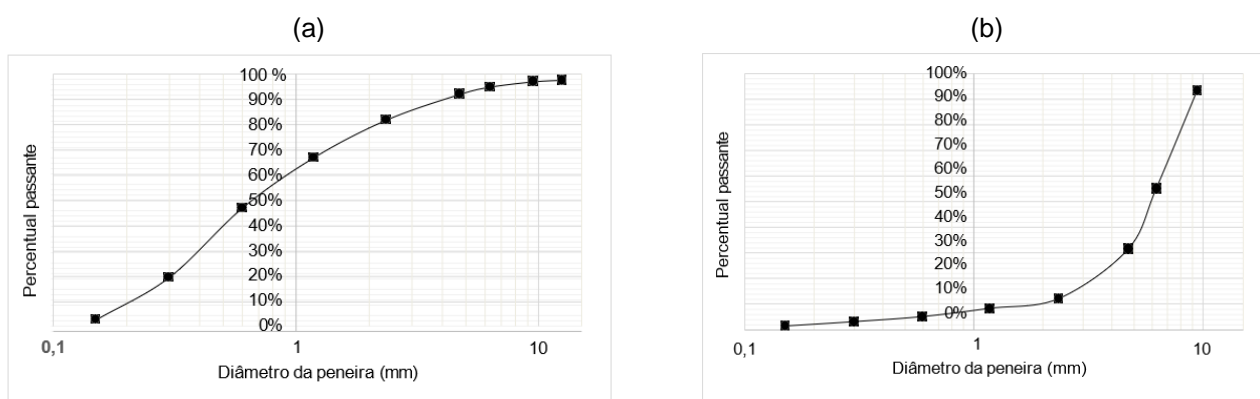
Foram utilizados agregados da cidade de Pombal-PB sendo, areia média e, brita 0 com dimensões de 4,75 mm a 9,5 mm.

Os ensaios foram realizados de acordo com as normas ABNT para determinar as propriedades físicas dos agregados miúdos e graúdos. Esses ensaios incluíram: análise granulométrica conforme a NBR 7181/2016, determinação da densidade e absorção de água para agregado miúdo conforme NBR 16916/2021, para agregado

graúdo seguindo a NBR 16917/2021, e determinação da massa unitária e do índice de vazios conforme NBR 16972/2021.

Os resultados dos ensaios estão expostos na Figura 1 mostrando a curva granulométrica da areia média (a) e brita 0 (b). Já na Tabela 1 é apresentado um resumo das propriedades física dos agregados de acordo com as normas mencionadas anteriormente.

Figura 1- Curva granulométrica para agregado miúdo (a) e agregado graúdo (b)



Fonte: O autor, 2024.

Tabela 1 - Propriedades físicas dos agregados

Agregado	Massa Específica (γ – g/cm ³)	Massa Unitária (μ – g/cm ³)
Miúdo	2,109	1,529
Graúdo	2,544	1,508

Fonte: O autor, 2024.

Cimento

O cimento utilizado foi o CP - V - ARI, sendo sua massa específica de 3,15 g/cm³.

Dosagem do concreto

Para este estudo, onde a resistência característica (f_{ck}) do concreto foi definida como 30 MPa, o traço em massa resultante foi de 1: 1,6: 1,9: 0,53 (Cimento: Areia: Brita: Água).

Os valores exibidos na Tabela 2 foram obtidos com base nos corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, que serviram como referência no desenvolvimento do traço. Os seis corpos de prova, cujos resultados estão apresentados nesta seção, foram moldados individualmente durante o processo de dosagem e não fazem parte do mesmo lote utilizado nas fases subsequentes.

Tabela 2 - Tensões máximas para corpos de prova – processo de dosagem experimental

AMOSTRAS	TENSÃO (MPa)
CP1	36,63
CP2	39,29
CP3	33,44
CP4	33,97
CP5	30,98
CP6	33,39
MÉDIA (f_{cm})	34,62
DESVIO PADRÃO (sd)	2,9129

Fonte: O autor, 2024.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

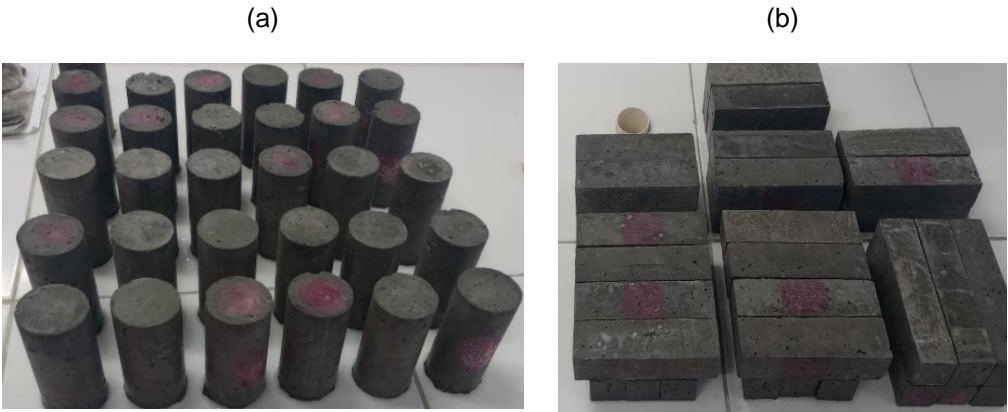
Corpos de prova

Na Figura 2 são mostrados os corpos de prova produzidos, os cilíndricos para analisar a tração por compressão diametral (a) e os prismáticos para a tração na flexão (b), com cinco amostras definidas para cada temperatura, totalizando 30 cilíndricos e 30 prismáticos ao longo de seis níveis de temperatura.

Os moldes cilíndricos, com dimensão de 5 x 10 cm, e os prismáticos, com dimensão de 4 x 4 x 16 cm, foram fabricados em material metálico. O processo de moldagem começou com a preparação dos moldes, aplicando óleo mineral para facilitar a desmoldagem, seguido pela mistura do concreto de acordo com o traço pré-definido. Posteriormente, o concreto foi colocado nos moldes e adensado manualmente seguindo as diretrizes das normas NBR 5739/2007 e NBR 5738/2015.

Após 24 horas, os corpos de prova foram retirados dos moldes e submersos em um tanque com água por 28 dias (Figura 3) para cura completa.

Figura 2 - Corpos de prova cilíndricos (a) e corpos de prova prismáticos (b)



Fonte: O autor, 2024.

Figura 3 - Corpos de prova submersos em água para cura.



Fonte: O autor, 2024.

Com as características e propriedades do concreto definidas, a etapa seguinte foi a análise do modelo de acoplamento dos danos entre tensão e temperatura.

Dessa forma, os corpos de prova cilíndricos e prismáticos foram submetidos aos seus respectivos níveis de aquecimento (Tabela 3), utilizando o forno mufla da SolidSteel (Figura 4).

Tabela 3 - Níveis de aquecimento

Ensaio		
Tração por compressão diametral	Tração na flexão	Temperatura (°C)
Corpos de prova		
5	5	25°C
5	5	300°C
5	5	450 °C
5	5	600 °C
5	5	750 °C
5	5	900 °C

Fonte: O autor, 2024.

Figura 4 – Forno mufla.



Fonte: O autor, 2024.

Após o equipamento atingir a temperatura escolhida, é então iniciado um período de uma hora, durante o qual os corpos de prova permanecem constantemente expostos à mesma temperatura. Depois desse intervalo de tempo, a mufla é desligada e aguarda-se o resfriamento natural, a fim de evitar choques térmicos nos objetos de ensaio. Posteriormente, os corpos de prova são expostos a cada nível de temperatura, conforme mostrado na Tabela 3 exibida anteriormente.

Ensaio mecânicos

A prensa hidráulica da Fortest modelo FT 02 (Figura 5), com capacidade para 200 toneladas, foi empregada para a realização dos ensaios. Além disso, foram utilizados os dispositivos de carga (Figura 6) para o ensaio de tração na flexão (a) e o ensaio de tração por compressão diametral (b), juntamente com a prensa. A sequência de execução dos ensaios seguiu conforme mostrado na Figura 7 para o ensaio de tração na flexão (a) e para o ensaio de tração por compressão diametral (b).

Figura 5 - Prensa manual



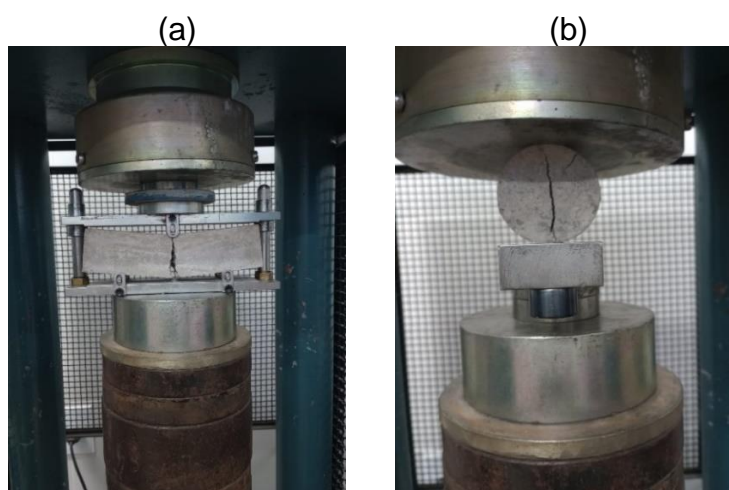
Fonte: O autor, 2024.

Figura 6 - Dispositivos de carga para tração na flexão (a) e tração por compressão diametral (b).



Fonte: O autor, 2024.

Figura 7 - Execução dos ensaios de tração na flexão (a) e tração por compressão diametral (b)



Fonte: O autor, 2024.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 4 e 5 são mostrados os dados obtidos dos ensaios de resistência a tração na flexão e tração por compressão diametral, respectivamente. Essas tabelas apresentam informações sobre como o concreto se comporta em resposta a diferentes níveis de temperatura.

Tabela 4 – Ensaio de tração na flexão

Temperatura (°C)	Cargas de ruptura (tf)						Tensão média (MPa)
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	Média	
25° C	0,59	0,60	0,60	0,59	0,59	0,59	13,66
300 °C	0,55	0,50	0,55	0,50	0,50	0,52	11,96
450° C	0,42	0,42	0,38	0,38	0,42	0,40	9,29
600 °C	0,33	0,33	0,38	0,33	0,38	0,35	8,05
750 °C	0,22	0,22	0,25	0,22	0,25	0,23	5,33
900° C	0,09	0,09	0,11	0,09	0,11	0,10	2,25

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 5 - Ensaio de tração por compressão diametral

Temperatura (°C)	Cargas de ruptura (tf)						Tensão média (MPa)
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	Média	
25° C	2,84	3,14	2,76	3,05	3,25	3,01	3,76
300 °C	2,65	2,72	2,30	2,30	2,68	2,53	3,16
450° C	1,97	1,92	1,97	2,01	1,92	1,96	2,45
600 °C	1,25	1,17	1,25	1,17	1,25	1,22	1,52
750 °C	0,92	0,84	0,84	0,84	0,92	0,87	1,09
900° C	0,59	0,50	0,50	0,50	0,59	0,54	0,67

Fonte: O autor, 2024.

A partir dos dados coletados, é possível determinar a tensão máxima suportada pelos corpos de prova durante o ensaio de tração na flexão. Para esse tipo de ensaio a tensão é determinada multiplicando o momento fletor máximo da peça pela distância da linha neutra até a extremidade, e então dividindo pelo momento de inércia da seção, conforme expresso na Equação 1, e tendo seus respectivos resultados na Tabela 6.

$$\sigma \text{ (Mpa)} = \frac{M \text{ (Nmm)} * y \text{ (mm)}}{I \text{ (mm}^4\text{)}} \quad (1)$$

Tabela 6 - Tensões médias de tração na flexão

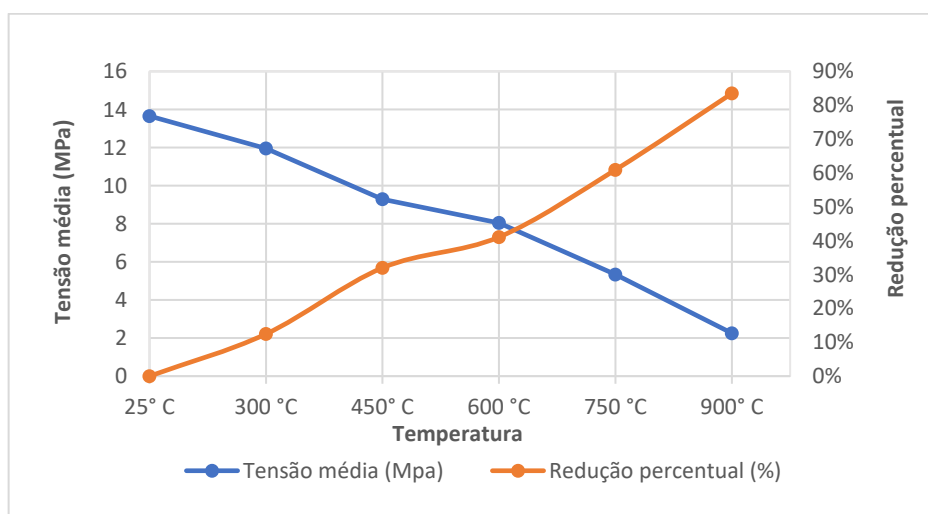
Temperatura (°C)	Cargas médias (tf)	Tensão média (MPa)	Redução percentual (%)
25° C	0,59	13,66	Referência
300 °C	0,52	11,96	12%
450° C	0,40	9,29	32%
600 °C	0,35	8,05	41%
750 °C	0,23	5,33	61%
900° C	0,10	2,25	84%

Fonte: O autor, 2024.

O ensaio de tração na flexão revela uma redução significativa na resistência do concreto com o aumento da temperatura. Em temperaturas elevadas, observa-se uma diminuição nas tensões de ruptura em comparação com a temperatura ambiente. A redução nas tensões de ruptura é mais pronunciada em temperaturas mais altas, como evidenciado pelos dados experimentais. Essa diminuição na resistência está intimamente ligada às mudanças na microestrutura do concreto devido à exposição ao calor (NEVILLE, 1997).

Na Figura 8, é evidenciado como a tensão varia em relação à temperatura, proporcionando uma compreensão do comportamento do material sob diferentes condições térmicas. Adicionalmente, são apresentados dados sobre o percentual de redução da resistência em relação a cada temperatura.

Figura 8 - Curva de tensão de tração na flexão por temperatura



Fonte: O autor, 2024.

Já com base nos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral, é possível determinar a máxima tensão suportada pelos corpos de prova considerando a relação entre a força aplicada e a área de seção transversal do corpo de prova, como mostrado na Equação 2 e com seus referentes resultados na Tabela 7.

$$\sigma \text{ (Mpa)} = \frac{2 * F}{\pi * d * L} \quad (2)$$

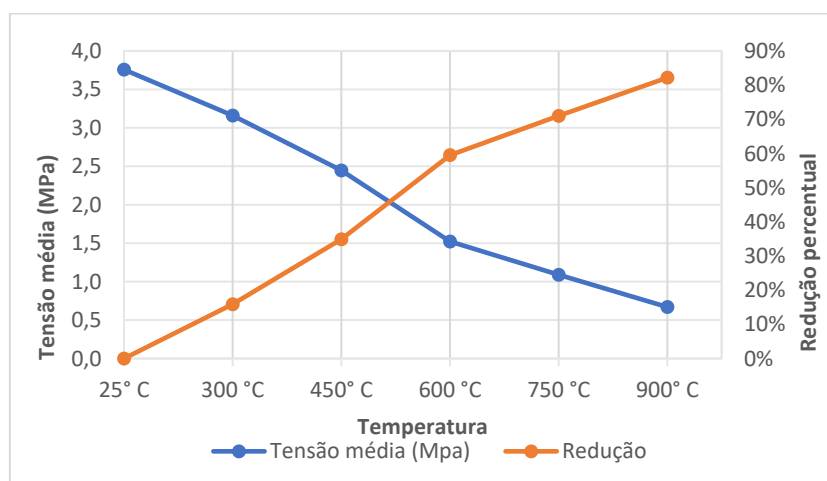
Tabela 7 - Tensões médias de tração por compressão diametral

Temperatura (°C)	Cargas médias (tf)	Tensão média (MPa)	Redução percentual (%)
25° C	3,04	3,76	Referência
300 °C	2,66	3,16	16%
450° C	2,08	2,45	35%
600 °C	1,17	1,52	60%
750 °C	0,87	1,09	71%
900° C	0,54	0,67	82%

Fonte: O autor, 2024

No ensaio de tração por compressão diametral, observa-se um padrão semelhante de redução na resistência do concreto com o aumento da temperatura. A diminuição nas tensões de ruptura é evidente à medida que a temperatura aumenta, mostrando os efeitos pertinentes das altas temperaturas nas propriedades mecânicas do concreto como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Curva de tensão de tração por compressão diametral por temperatura



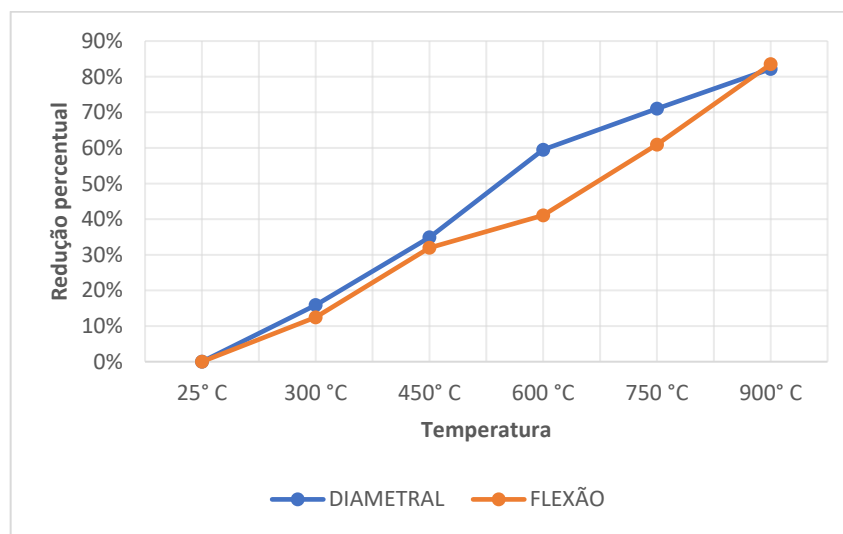
Fonte: O autor, 2024.

Tabela 8 - Redução percentual da resistência em relação a temperatura

Temperatura	Diametral	Flexão
25° C	Referência	Referência
300 °C	16%	12%
450° C	35%	32%
600 °C	60%	41%
750 °C	71%	61%
900° C	82%	84%

Fonte: O autor, 2024.

Figura 10 - Redução percentual da resistência



Fonte: O autor, 2024.

Os resultados dos ensaios de tração na flexão e tração por compressão diametral revelam padrões semelhantes de redução na resistência do concreto com o aumento da temperatura. No entanto, ao comparar os resultados dos dois ensaios, algumas diferenças podem ser observadas (Figura 10).

Nas temperaturas iniciais, de 300°C e 450°C, os percentuais de redução são semelhantes, sendo o de tração na flexão ligeiramente menor. Já nas temperaturas de 600°C e 750°C os resultados do ensaio de tração por compressão diametral, mostram uma maior redução de resistência quando comparado a flexão. E a 900°C, em ambos, há uma redução acentuada de resistência.

Estudos como os de Fernandes et al. (2017), Lima (2005), e Li et al. (2023) corroboram esses achados, sugerindo que a resistência à tração por compressão diametral é mais sensível às mudanças microestruturais induzidas por altas temperaturas. Essas pesquisas indicam que a formação de microfissuras e a

desidratação do gel de sílica, bem como a decomposição de compostos hidratados, são mais prejudiciais nos ensaios de compressão diametral.

Dias et al. (2019) confirmaram que a microestrutura do concreto se altera após exposição a temperaturas superiores a 300°C, o que afeta negativamente suas propriedades mecânicas.

CONCLUSÃO

A exposição do concreto a temperaturas elevadas resulta em uma redução significativa em sua resistência mecânica. Tanto os ensaios de tração na flexão quanto os ensaios de tração por compressão diametral demonstraram uma diminuição progressiva nas tensões de ruptura conforme a temperatura aumenta, sendo suas reduções mais notáveis em temperaturas acima de 450°C.

Os dados indicam que a tração por compressão diametral é mais sensível às mudanças estruturais do concreto induzidas pelo calor, especialmente nas temperaturas de 600°C e 750°C. Essa redução na resistência está associada a alterações na microestrutura do concreto, incluindo a perda de água livre e a desidratação do gel de sílica, que afetam adversamente suas propriedades mecânicas.

Visualmente, observou-se uma descoloração e aumento da porosidade nos corpos de prova expostos a temperaturas elevadas, confirmando a deterioração da microestrutura do concreto.

Esses resultados indicam que o concreto é mais suscetível à deterioração mecânica em temperaturas mais altas, o que tem implicações significativas para o projeto e a construção de estruturas de concreto expostas a condições de incêndio ou a ambientes de alta temperatura. Sendo assim, é essencial considerar os efeitos da temperatura durante o processo de projeto e dimensionamento das estruturas de concreto, a fim de garantir sua integridade estrutural e desempenho adequado sob condições adversas.

LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Durante o desenvolvimento da pesquisa, limitações laboratoriais foram encontradas, influenciando os rumos e os resultados do estudo. A prensa disponível no laboratório, essencial para a aplicação de cargas no concreto, não possuía um software compatível para a aquisição e registro dos dados de tensão x deformação.

Este impedimento impossibilitou a obtenção de dados que são cruciais para uma análise detalhada do modelo constitutivo de dano elastoplástico.

Devido à restrição mencionada, a pesquisa teve que ser redirecionada. Em vez de focar na avaliação experimental do modelo constitutivo de dano elastoplástico, a análise foi concentrada no comportamento à tração do concreto submetido a altas temperaturas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementar esta pesquisa, seria relevante que trabalhos futuros realizassem análises microestruturais detalhadas, avaliassem o comportamento do concreto pós-incêndio, comparassem diferentes tipos de agregados, e desenvolvessem modelos constitutivos de dano para prever o comportamento do concreto sob altas temperaturas. Essas abordagens forneceriam uma compreensão mais abrangente e detalhada da resistência do concreto em condições térmicas extremas, assim, contribuindo para a melhoria de materiais e técnicas na engenharia civil.

AGRADECIMENTOS

REFERÊNCIAS

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

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

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. NBR 12142:2010. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. NBR 7222:2010. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. NBR 5739:2007. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

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

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

BASTOS, P. S. **Fundamentos Do Concreto**. v. 1, p. 1–19, 2021.

CARVALHO, E. F. T. **Contribuição ao estudo da resistência residual do concreto submetido ao tratamento térmico padrão para situações de incêndio**. 2001. 109 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação do Departamento de

Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

CASTRO, A. L.; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI V. C. **Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas.** São Carlos, SP, 2011.

COSTA, P. R. S. **Manifestações patológicas nas estruturas de concreto sujeitas a altas temperaturas.** Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

DIAS, A. R. O., et al., **Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas.** Fortaleza, CE: UFC, 2019.

FARIAS, L.A. et al. – **Relação entre os Parâmetros de Resistência do Concreto - 45º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON – Vitória - ES, 2003.**

FERNANDES, B. et al. **Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas:**

alterações físico-químicas e técnicas de análise. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São

Paulo, v. 10, n. 4, p. 838-863, 2017. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/riem/a/Fn8Q7Vqx6rDYRNJMPNTwMwk/?format=pdf&lang=pt>

Acesso em: 15 maio. 2024.

FERREIRA, A. P. G. **Modelagem dos fenômenos de transporte termo-hídricos em meios porosos submetidos a temperaturas elevadas: aplicação a uma bicamada rocha-concreto.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

GUO, Z.; SHI, X. **Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures,** Oxford: Butterworth Heinemann, 2011, 311 p.

LI, X. et al. **Experimental Investigation of the Static Expansion Tensile Behavior of Concrete after Exposure to Elevated Temperatures.** Fire Technology, v. 59, n. 6, p. 3667–3687, 2023.

LI, W. **Experimental investigation on strength and deformation of concrete at high temperature.** Dissertação (Mestrado)—Universidade de Tsinghua, Beijing, 1991.

LIMA, R. C. A. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

LIU, L. **Fire Performance of High Strength Concrete Materials and Structural.** 2009. 251 p. Tese (Doctor of Philosophy)-Faculty of The College of Engineering and Computer Science, Florida Atlantic University, Florida, 2009.

LV, N. et al. **Dynamic tensile properties and energy dissipation of high-strength concrete after exposure to elevated temperatures.** Materials, v. 13, n. 23, p. 1–19, 2020.

MA, Q. et al. **Mechanical properties of concrete at high temperature-A review.** Construction and Building Materials, v. 93, p. 371–383, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Microestrutura, Propriedade e Materiais.** 2.ed. p. 751. Natal: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Editora PINI, São Paulo, 1997.

OLUOKUN, F. A. **Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive Strength: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete.** ACI Materials Journal. May-June 1991. pp. 302-309.

SOUZA, L. D. P. S. **Análise do comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas às altas temperaturas utilizando a metodologia do planejamento fatorial.** 2016. 112 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-

graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

SÜSSEKIND, J. F. C. **Curso de análise estrutural**. 8. ed. Rio de Janeiro, 1985.

YU, Z. et al. **Research on uniaxial mechanical performance of high-performance concrete after high temperature rapid cooling and damage mechanism analysis**. Journal of Building Engineering, v. 86, n. February, p. 108921, 2024.