

## **COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE EDIFICAÇÕES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: UMA REVISÃO PRELIMINAR**

*Leticia Mattana<sup>1</sup>*

*João Carlos Souza<sup>2</sup>*

### **RESUMO**

Edifícios em situação de incêndio podem causar desastres de grandes proporções, como os ocorridos no Brasil em 2018, no Museu Nacional e Edifício Wilton Paes de Almeida, no Clube *Station Nightclub* nos Estados Unidos em 2003 ou no supermercado *Ycuá Bolaños* no Paraguai, em 2004. O colapso da estrutura de edificações devido à presença do fogo e elevadas temperaturas compromete a evacuação segura e o acesso dos bombeiros, podendo causar mortes e/ou perdas materiais. Este artigo tem como objetivo identificar o estado da arte sobre o comportamento de estruturas em situação de incêndio nos países do Continente Americano. A metodologia compreende busca sistemática na literatura pelo Método *Systematic Search Flow* (SSF) na base de dados Scopus®. Foram encontrados 38 artigos correlatos que pautavam com os assuntos de interesse. Realizadas as análises, foram selecionados 14 artigos alinhados com o objetivo desta pesquisa. A análise dos documentos possibilitou a sistematização de títulos, autores, data da publicação, nacionalidade das instituições, número de pesquisadores, revista científica, objetivos, métodos, palavras-chave, citações e contribuições sobre o comportamento de estruturas em situação de incêndio. Percebe-se a existência de poucas pesquisas no Brasil tratando do comportamento de estruturas em situações de incêndio, indicando que o assunto pode ser mais explorado.

**Palavras-Chave:** Busca Sistemática. Método SSF. Colapso. Fogo.

---

<sup>1</sup> Engenheira Civil. Doutoranda do programa PósArq pela Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: [leticia.mattana@ufsc.br](mailto:leticia.mattana@ufsc.br)

<sup>2</sup> Doutor, Professor e Orientador no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: [joao.carlos@ufsc.br](mailto:joao.carlos@ufsc.br)

## **BEHAVIOR OF BUILDING STRUCTURES IN FIRE SITUATION**

### **ABSTRACT**

Buildings in a fire situation can cause major disasters, for example, two occurred in Brazil in 2018, at the National Museum and the Wilton Paes Almeida Building, as at the Station Nightclub in the United States in 2003 or at the Ycuá Bolaños supermarket in Paraguay, in 2004. The collapse of the structure of the buildings due to the presence of fire and high temperatures compromises the safe evacuation and access of firefighters and can cause death and/or material losses. This article aims to identify the state of the art of structures in fire situation in the American Continent countries. The methodology comprises a systematic search through SystematicSearchFlow Method (SSF) in the Scopus® database. 38 correlated papers were found that guided the subjects of interest. After the analysis, 14 papers aligned with the objective were selected. The analysis of the documents made possible the systematization of titles, authors, date of publication, nationality of institutions, number of researchers, journal, objectives, methods, keywords, citations and contributions on the behavior of structures submitted to fire. It's noticed the existence of few investigations in Brazil dealing with the behavior of structures in fire situations, which indicates that the subject can be more explored.

**Keywords:** Systematic Search. SSF Method. Collapse. Fire.

**Artigo Recebido em 09/07/2020 e Aceito em 25/01/2021**

## 1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que uma edificação em situação de incêndio pode ficar com sua estrutura comprometida. Isto acarreta perda de estabilidade e possibilidade de colapso e/ou ruína. Tendo esta temática como foco principal, este artigo apresenta algumas pesquisas e estudos que colaboram com o entendimento do comportamento das estruturas em situação de incêndio.

O fogo é um rápido processo de oxidação acompanhado da evolução de calor e luz nas mais variadas intensidades. Quando fora de controle, o fogo pode dar origem a um incêndio, com graves consequências possíveis. Para ocorrência de fogo é necessário que três elementos estejam presentes: o combustível, o oxigênio (ou outro comburente) e o calor. A reunião de determinadas proporções destes elementos forma o conhecido “*triângulo de fogo*”. O incêndio pode ser controlado quando um desses três elementos é removido do processo (KLINOFF, 2003).

A prevenção de incêndios evoluiu ao longo da história, através da ocorrência de sinistros em edifícios, hotéis, indústrias, repartições públicas, embarcações, hospitais e escolas. A filosofia da prevenção de incêndios inclui uma grande gama de variáveis, e nem sempre estão relacionadas diretamente com a prevenção do fogo, mas sim com a prevenção do espalhamento do fogo nos ambientes (ROBERTSON, 2005).

Beata e Jeffers (2015) comentam que é frequente a situação de incêndio de progresso rápido, também conhecida como *flashover*, na qual o calor aquece gradualmente os materiais combustíveis do ambiente fazendo com que eles entrem em ignição simultaneamente, gerando o incêndio generalizado. Para esses casos, os autores descrevem que vários estudos abordam situações voltadas para pequenos ambientes, que geralmente são regulares, mas que poucos são os estudos que tratam da questão para grandes locais abertos devido a complexidade do comportamento do fogo.

Hall Jr (2004) apud Rackauskaite *et al.* (2015) diz que o fogo acidental em edifícios pode causar desastres, e que a maioria das mortes nos incêndios de grandes proporções são causadas pela fumaça, antes que ocorra qualquer colapso estrutural. Apesar disso, sabe-se que o comportamento estrutural em situações de incêndio são críticas, visto a perda de estabilidade que pode comprometer a evacuação e o acesso seguro dos bombeiros ao local.

As avaliações de resistência ao fogo em estruturas estão baseadas em experimentos com elementos estruturais (HOGGE, 1977). Percebe-se atualmente, a existência de pesquisas que trazem inovações tecnológicas no combate a incêndios, por meio do uso de inteligência artificial e robôs para reduzir ferimentos e mortes de bombeiros no socorro, bem como aumentar sua eficiência na execução de tarefas em uma situação de incêndio (KIM; JO; LATTIME, 2016).

Para Li *et al.* (2015), a realização de busca em um local de incêndio é perigosa e difícil para os socorristas, podendo ocorrer vítimas secundárias nessas situações de riscos. Para isso, os autores propõem uma estrutura de localização interna baseada em radiofrequência, permitindo informações de localização precisas que podem auxiliar bombeiros em um local de incêndio. Isso levaria à redução das chances de se perderem ou ficarem presos na edificação, e de melhorar a eficiência na execução de tarefas atribuídas. Os autores utilizaram um modelo BIM (*Building Information Modeling*), que contribui com informações geométricas e espaciais da edificação, e um *plugin* personalizado para fazer a interação usuários-sistema-modelo BIM por meio dessas ferramentas.

As estruturas de edificações podem ser de diversos materiais, sendo o aço e o concreto armado os mais comuns nas edificações do Continente Americano. Em relação ao aço, Arabouei e Kobur (2015) afirmam que apesar de possuir inúmeras vantagens estruturais, como alta relação resistência-peso, alto nível de ductilidade e facilidade no processo de fabricação e construção, este é um material que não resiste bem ao fogo devido à alta condutividade

térmica e rápida diminuição das propriedades de resistência quando exposto a altas temperaturas.

Para o aço estrutural, sabe-se da possibilidade de uso de um isolamento contra incêndio através de materiais resistentes ao fogo aplicados por pulverização (material chamado de SFRM - *Spray Applied Fire Resistive Materials*) que são aplicados externamente à superfície do aço para retardar o aumento de temperatura na estrutura e a degradação das propriedades de rigidez e resistência. Os autores complementam que “... o desempenho de incêndio das estruturas de aço depende inteiramente da eficácia do isolamento contra incêndio aplicado nas estruturas.” (ARABOUEI; KOBUR, 2015, pg. 1).

Andrade e Souza (2015) explicam que existem basicamente três possibilidades de uso de materiais nos projetos de edificações com estruturas em aço, com a finalidade de auxiliar na proteção contra incêndio: (1) Materiais projetados na superfície do aço, (2) tintas intumescentes e (3) Materiais Rígidos ou Semirrígidos, que podem ser aplicados a seco por meio de parafusos. Esses autores apresentam os vários tipos de proteções contra incêndio em elementos estruturais como lajes, pilares e vigas de aço e a relação com o projeto de edificações.

Em relação ao concreto armado, Bao *et al.* (2017) descrevem que durante um incêndio, a capacidade de carga de estruturas em concreto pode ficar comprometidas devido às propriedades degradadas no material e à fragmentação associada às elevadas temperaturas. Uma das formas de medir as temperaturas nessas estruturas é através de termopares, para posteriormente estimar as distribuições de temperatura dentro das estruturas de concreto.

Segundo Rocha e Da Silva (2017), para estruturas em concreto armado, o concreto, que resiste melhor ao fogo do que o aço, forma um reforço ao aço para protegê-lo contra o fogo, dando maior tempo para a evacuação. Porém, nessas situações, a estrutura de concreto pode colapsar através de

reações químicas do concreto, tais como expansões, fragmentações, fissurações e perda de resistência do material, comprometendo a segurança.

Vichit-Vadakan e Kerr (2009) afirmam que o concreto possui boa resistência ao fogo devido a sua baixa condutividade térmica e por não ser considerado um material combustível, mas destacam que ao ser exposto a altas temperaturas, o concreto pode sofrer danos nos poros e degradação química do hidrato de silicato de cálcio, perdendo sua resistência.

Prever o comportamento de uma estrutura em situação de incêndio é uma tarefa complexa. Papadopoulos *et al.* (2008) apud Landesmann (2011, p.1) afirmam que *“as equações de código não são capazes de descrever o comportamento real das estruturas no fogo, especialmente quando as deformações globais são grandes e o comportamento não-linear torna-se relevante”*. Apesar da existência do método dos elementos finitos, que atualmente permite a simulação estrutural completa com respostas térmicas e mecânicas do fogo em uma edificação, ainda há dificuldade para interpretar os resultados obtidos pela demanda de tempo necessário para tal atividade e pela grande quantidade de dados numéricos existentes nas análises.

## **1. METODOLOGIA**

### **1.1 MÉTODO**

Para Farenhof e Fernandes (2016), *“a revisão da literatura é a base para a identificação do atual conhecimento científico”*. Esses autores comentam que existem diversas formas de revisão, dentre elas a narrativa, a sistemática e a integrativa. O foco deste estudo é a realização de uma busca sistemática, explicada pelos referidos autores como um método de investigação científica que propõe eliminar vieses através de um planejamento e sistematização de buscas em bases de dados científicas, estruturando um portfólio bibliográfico.

Este processo foi chamado pelos autores de Método SSF, e é composto por 4 fases e 8 atividades.

Na primeira fase realiza-se a definição do Protocolo da Pesquisa, onde ocorre a proposição da estratégia de busca, a consulta nas bases de dados, a organização do portfólio bibliográfico, a padronização e seleção dos artigos e a composição do portfólio dos documentos selecionados. A segunda fase refere-se à **Análise** dos documentos selecionados, consolidando os dados da pesquisa. A terceira fase compreende a elaboração de relatórios que sintetizam a pesquisa realizada. A quarta e última fase propõe a escrita científica com base no método utilizado (FARENHOF; FERNANDES, 2016).

## 1.2 PROCEDIMENTOS

### 1.2.1 Protocolo da Pesquisa

#### 1.2.1.1 Estratégia de Busca e Consulta na Base de Dados

Realizou-se a busca no dia 28 de outubro de 2018, no banco de dados da Scopus®, para a *query* “*structure AND fire*”, Busca limitada aos títulos, palavras-chaves e resumos, período ilimitado, tipo de documento que exclui literatura cinzenta, ou seja, apenas trabalhos científicos revisados aos pares e acesso aberto para os trabalhos na íntegra.

Desta primeira busca foram encontrados 1731 documentos no total. Na sequência foram aplicados alguns critérios de inclusão, através dos filtros: (1) Foi definida a área de pesquisa para “*Engineering*”, ou seja, somente artigos relacionados com engenharia e (2) artigos na língua portuguesa e em inglês. Com esses filtros, obteve-se 231 trabalhos. Essa etapa será chamada de “*1º Filtro*”.

Para finalizar, optou-se pela aplicação de um filtro para restringir a pesquisa para países do Continente Americano, selecionando os países disponíveis

(Brasil, Colômbia e Estados Unidos). Desta busca, resultaram 38 documentos. Essa etapa foi caracterizada como “2ª Filtro”.

#### 1.2.1.2 Organização do Portfólio Bibliográfico

Optou-se pelo uso do organizador bibliográfico Endnote®, para onde foram exportados os 38 documentos encontrados pela busca na base de dados da Scopus®. Neste organizador, após a exportação direta da base Scopus® para o software Endnote®, foi realizada a busca automática pelo texto na íntegra para todos os documentos cadastrados. Nesta busca automática, foram encontrados os textos completos para 33 documentos. Foi realizada uma busca de forma manual e complementar para obter os cinco textos faltantes para leitura do trabalho completo.

#### 1.2.1.3 Padronização e Seleção dos Artigos

Foi realizada a leitura de todos os títulos, resumos e palavras-chave, para realizar a primeira filtragem dos documentos encontrados nesta busca, selecionando somente os trabalhos que estão com o tema alinhado aos objetivos dessa pesquisa. Nesta etapa, caracterizada como “3º Filtro”, 22 artigos foram selecionados.

#### 1.2.1.4 Composição do Portfólio com documentos selecionados

Nesta fase, após a filtragem por meio da leitura do título, resumo e palavras-chave, foi realizada a leitura de todos os 22 textos na íntegra. Foram feitas as análises pelas leituras da bibliografia e selecionados os trabalhos que estavam alinhados com o objetivo da pesquisa, que totalizaram 14 artigos.

### 1.2.2 Análise de documentos



Após, foi utilizada uma matriz do conhecimento para análise das informações obtidas pela pesquisa, conforme proposto por Farenhof e Fernandes (2016), através do uso da ferramenta MS Excel. Esta Matriz serviu para sintetizar as informações coletadas na análise dos documentos, de forma a sistematizar o conhecimento e preparar as informações para a elaboração dos relatórios. Após a obtenção dos relatórios, foi realizada a escrita científica, que será apresentada nos resultados.

## **2. RESULTADOS**

### **2.1 RELATÓRIOS**

A Tabela 1 apresenta um resumo das principais informações dos 14 estudos elencados anteriormente, com os autores dos trabalhos, o ano de publicação, o título do artigo, e a revista científica na qual foi publicado.

Tabela 1 – Síntese dos Trabalhos

Artigo	Autor(es)	Ano	Revista Científica	Título
1	Arablouei, A. e Kodur, V.	2015	Engineering Fracture Mechanics	Cohesive zone model properties for evaluating delamination of spray-applied fire-resistive materials from steel structures
2	Bao, Y.; Chen, G.; Hoehler, M. S.; Smith, C. M.; Bundy, M.	2017	Smart Materials and Structures	Temperature measurement and damage detection in concrete beams exposed to fire using PPP-BOTDA based fiber optic sensors
3	Paul A. Beata, Ann E. Jeffers	2015	Fire Safety Journal	Spatial homogenization algorithm for bridging disparities in scale between the fire and solid domains
4	Hogge, M. A.	1977	Applied Mathematical Modelling	Modelled thermal response of structures in fire environments
5	Landesmann, A.	2011	Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering	Inelastic analysis of semi-rigid composite structures under fire conditions
6	Mourão, H. D. R. E Silva, V. P.	2007	Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering	On the behaviour of single-span steel beams under uniform heating
7	Pakala, P. Kodur, V.	2015	Engineering Structures	Effect of concrete slab on the behavior of fire exposed subframe assemblies with bolted double angle connections
8	Rackauskaite, E.; Hamel, C.; Law, A.; Rein, G.	2015	Structures	Improved Formulation of Travelling Fires and Application to Concrete and Steel Structures
9	Rahnavard, R.; Thomas, R. J.	2018	Case Studies in Thermal Engineering	Numerical evaluation of the effects of fire on steel connections; Part 1: Simulation techniques
10	Rocha, P. A. S. da Silva, K. I.	2017	Revista Int. de Metodos Num. para calculo y Diseno en Ingenieria	Study of Beams's Performance on Fire by the Fibers Model
11	Talebi, E.; Tahir, M. M.; Zahmatkesh, F. Kueh, A. B. H. Said, A. M.	2018	Advanced Steel Construction	Fire resistance of a damaged building employing buckling restrained braced system
12	Vásquez-Molina, D.; Mejía-Arcila, J. M.; Mejía-De Gutiérrez, R..	2016	DYNA (Colombia)	Mechanical and thermal performance of a geopolymeric and hybrid material based on fly ash
13	Vichit-Vadakan, W.; Kerr, E. A.	2009	Journal of Advanced Concrete Technology	Transport properties of fire-exposed concrete
14	Wang, W.; Qin, S.; Kodur, V.; Wang, Y.	2018	Advanced Steel Construction	Experimental study on evolution of residual stress in welded box-sections after high temperature exposure

Fonte: elaboração própria (2020)

## Data de Publicação

Analisando-se as datas de publicação dos trabalhos indicados na Tabela 1, percebe-se que 3 trabalhos foram publicados em 2018, 2 trabalhos em 2017, 4 em 2015 e um em cada um dos seguintes anos: 2016, 2011, 2009, 2007 e em 1977. Dez trabalhos tiveram publicação nos últimos 5 anos, o que

demonstra que o assunto está sendo pesquisado recentemente. Percebe-se um trabalho datado de 1977.

### **Revista Científica da Publicação**

As revistas científicas nas quais foram publicados os artigos selecionados estão apresentadas na sequência, e entre parênteses encontram-se o número de trabalhos utilizados nesta pesquisa provenientes de cada revista: *Engineering Fracture Mechanics* (1), *Smart Materials and Structures* (1), *Fire Safety Journal* (1), *Applied Mathematical Modelling* (1), *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (2), *Engineering Structures* (1), *Structures* (1), *Case Studies in Thermal Engineering* (1), *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria* (1), *Advanced Steel Construction* (2), *DYNA – Colombia* (1), *Journal of Advanced Concrete Technology* (1).

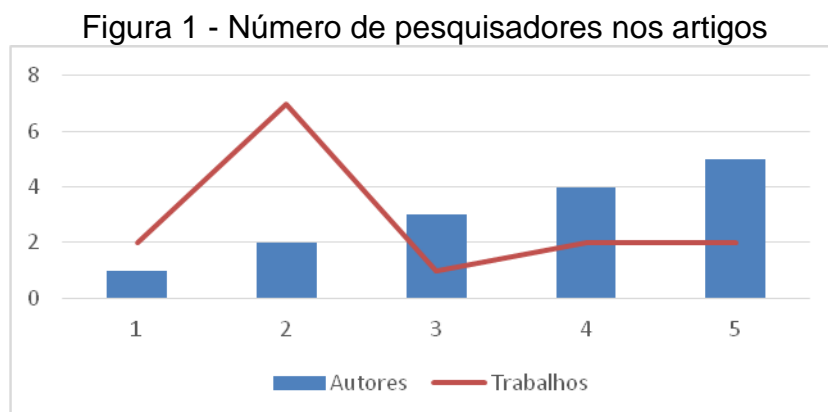
### **Nacionalidade da Instituição**

As instituições que desenvolveram estas pesquisas no Continente Americano pertencem aos países: Brasil, Colômbia e Estados Unidos. Nove trabalhos possuem autores/coautores americanos, sendo que destes, quatro são de origem tailandesa, malaio, inglês e chinês, mas possuem coautores de instituições americanas. Quatro trabalhos foram desenvolvidos em instituições brasileiras e um trabalho é de instituição colombiana.

### **Número de pesquisadores do trabalho**

Quanto ao número de pesquisadores desses trabalhos, os resultados mostram que somente 2 trabalhos têm autoria única, 7 trabalhos possuem dois pesquisadores na equipe, um trabalho tem 3 pesquisadores envolvidos, 2

trabalhos possuem 4 pesquisadores e outros 2 trabalhos possuem 5 pesquisadores na equipe. Metade das pesquisas foram realizadas por dois autores. A Figura 1 apresenta uma síntese dos números de pesquisadores por artigo.

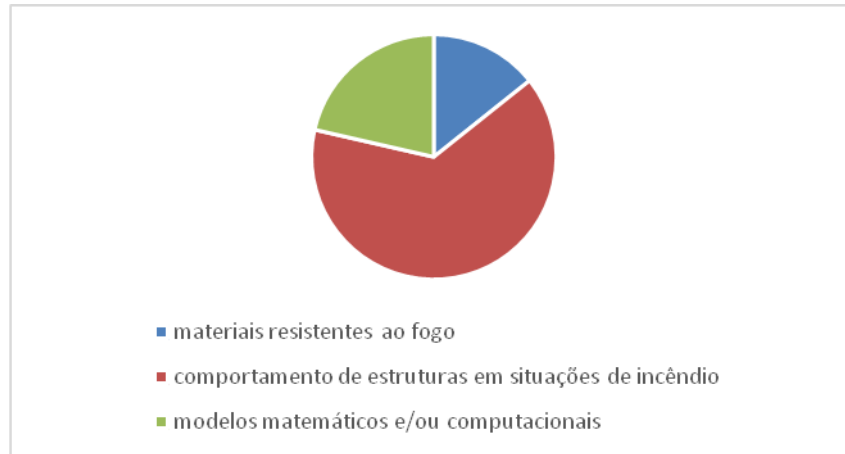


Fonte: elaboração própria (2021)

### Objetivos teóricos

A síntese dos objetivos encontrados nos artigos está apresentada na Figura 2, e todos os objetivos estão descritos na Tabela 2. Dois trabalhos têm foco principal na análise de materiais resistentes ao fogo para proteção de sistemas estruturais (Estudos 1 e 12), nove trabalhos analisam o comportamento de estruturas em situações de incêndio (Estudos 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14), três artigos propõem modelos matemáticos e/ou computacionais para estudar o comportamento de estruturas em situação de incêndio (Estudos 3, 4, 7).

Figura 2 - Objetivos das pesquisas x Quantidade de artigos



Fonte: elaboração própria (2021)

Tabela 2 – Objetivos dos artigos

Artigo	Tópico Principal
1	Estudar material resistente ao fogo aplicado por pulverização (SFRM) em estrutura de aço.
2	Medir distribuições de temperatura e detectar trincas em estruturas de concreto submetidas ao fogo, com uso de sensor de fibra ótica.
3	Apresentar um algoritmo de homogeneização espacial para capturar condições de contorno não uniformes a partir de simulação de fogo.
4	Definir uma técnica computacional baseada em elementos finitos para cálculo de respostas térmicas não lineares em estruturas de concreto submetidas a situações de incêndio.
5	Fornecer uma análise inelástica de estruturas semirrígidas em aço e compósito (aço-concreto) sob condições de incêndio.
6	Analisar o comportamento de vigas de aço sob elevação uniforme de temperatura.
7	Apresentar um modelo tridimensional de elementos finitos não-lineares para avaliar resposta a incêndios no sistema de conexões
8	Mostrar a Metodologia dos Foguetes Viajantes (TFM) que foi desenvolvida para levar em conta o comportamento não uniforme do fogo.
9	Compreender o desempenho das conexões de aço e sua resposta ao fogo
10	Apresentar a análise numérica de vigas de concreto com seções retangulares e T, e vigas mistas de aço e concreto, a altas temperaturas.
11	Investigar a influência de sistemas de contraventamento com restrição (BRBs) na estabilidade estrutural contra incêndio após um incidente grave
12	Apresentar uma avaliação do comportamento térmico de um material híbrido (FA / OPC) e geopolimérico (FA100) para uso em estruturas
13	Estudar a resistência do concreto exposto a temperaturas elevadas e medir a optividade.
14	Investigar as tensões residuais pós-incêndio em seções em forma de caixa soldada.

Fonte: elaboração própria (2020)

## Métodos de pesquisa

Foram apurados os métodos utilizados nos estudos de estruturas em situação de incêndio. Três trabalhos têm caráter unicamente teórico, pois referem-se à trabalhos de dedução matemática e/ou cálculos com auxílio computacional (4, 5, 10). Quatro trabalhos possuem abordagem teórico-prática,

pois realizam pesquisa experimental para comprovar os resultados e hipóteses teóricas (Estudos 3, 6, 7, 8). Os demais trabalhos possuem caráter experimental, realizados em laboratórios através de testes físicos ou computacionais, portanto práticos (Estudos 1, 2, 9, 11, 12, 13, 14).

### **Palavras-chave**

Foram encontradas 225 palavras-chave no total na análise dos estudos. Apenas 12 palavras-chave são vistas com frequência em mais de um artigo, conforme mostra a Tabela 3. As demais 213 palavras-chave ocorrem apenas uma vez e não serão mencionadas nesta pesquisa.

Tabela 3 - Palavras-chave

Palavra-chave	Frequência
Fires	7
Steel structures	2
Fire resistance	6
Fire safety	2
Concretes	3
Finite element method	5
Heat transfer	2
Numerical methods	2
Structures	2
Boundary conditions	2
Buckling	2
Fire response	2

Fonte: elaboração própria (2020)

### **Citações**

A Tabela 4 apresenta quantas citações foram feitas para cada estudo, mostrando que o artigo mais antigo, publicado no ano de 1977, apresenta apenas 1 citação e os mais recentes de 2018 não possuem citação até o momento. Os pesquisadores já anteviam um pequeno resultado de citações para os artigos recentemente publicados, devido à brevidade que consta para referência na comunidade acadêmica.

Tabela 4 – Citações

Artigo	Autor(es)	Ano	Citações
1	Arablouei, A. e Kodur, V.	2015	2
2	Bao, Y.; Chen, G.; Hoehler, M. S.; Smith, C. M.; Bundy, M.	2017	3
3	Paul A. Beata, Ann E. Jeffers	2015	3
4	Hogge, M. A.	1977	1
5	Landesmann, A.	2011	0
6	Mourão, H. D. R. E Silva, V. P.	2007	7
7	Pakala, P. Kodur, V..	2015	3
8	Rackauskaite, E.; Hamel, C.; Law, A.; Rein, G.	2015	9
9	Rahnavard, R.; Thomas, R. J.	2018	0
10	Rocha, P. A. S. da Silva, K. I.	2017	0
11	Talebi, E.; Tahir, M. M.; Zahmatkesh, F. Kueh, A. B. H. Said, A. M.	2018	0
12	Vásquez-Molina, D.; Mejía-Arcila, J. M.; Mejía-De Gutiérrez, R..	2016	2
13	Vichit-Vadakan, W.; Kerr, E. A.	2009	5
14	Wang, W.; Qin, S.; Kodur, V.; Wang, Y.	2018	0



Fonte: elaboração própria (2020)

## 2.2 ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO

O Estudo 1 objetiva analisar a fratura em zona de aderência entre modelos estruturais e o revestimento de peças estruturais com material resistente ao fogo. Esses materiais são conhecidos como *Spray Applied Fire Resistive Materials* (SFRM) e são amplamente utilizados para isolar estruturas do fogo no caso de incêndio em edificações. São realizados experimentos utilizando três tipos diferentes de materiais SFRM: (1) à base de Cimento Portland, (2) à base de gesso de média densidade e (3) à base de fibra mineral. Como resultados, esses autores obtiveram que os SFRM não são materiais puramente quebradiços, mas sim quase quebradiços. Também constataram que o SFRM à base de cimento Portland de média densidade possui a maior força de aderência e a menor ductilidade de deslocamento sobre a zona coesiva (propriedade que representa o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura), enquanto que o SFRM à base de gesso de densidade média possui menor força de aderência em comparação com o SFRM à base de cimento Portland e tem maior ductilidade de deslocamento sobre a zona coesiva. O SFRM à base de fibra mineral possui a menor força coesiva e energia de fratura, mas possui a maior ductilidade coesiva.

O Estudo 2 mostra experimentos com um sensor de fibra ótica distribuído baseado em espalhamento de Brillouin, que é implementado dentro de peças estruturais para medir temperaturas distribuídas espacialmente em vigas de concreto armado submetidas ao fogo. Quatro vigas foram testadas para falha em um incêndio de um compartimento abastecido a gás natural. Cada experimento foi realizado com os seguintes equipamentos: uma sílica fundida, uma fibra ótica com um sensor distribuído e quatro termopares incorporados nos elementos estruturais. Distribuições de temperatura não uniforme foram

observadas em todas as vigas testadas, e dentro das rachaduras do concreto foram identificados picos da distribuição de temperatura, uma vez que as rachaduras foram preenchidas com ar quente, acelerando assim a transferência de calor local da superfície da viga de concreto para o interior das peças estruturais. A fissuração do concreto não afetou a sensibilidade do sensor distribuído, mas a fragmentação do concreto por meio das fissuras quebrou o circuito de fibra óptica necessário para as medições desta pesquisa.

O Estudo 3 apresenta um algoritmo de homogeneização espacial para capturar condições de contorno não uniformes, a partir de uma simulação de fogo de alta resolução em um modelo estrutural. O algoritmo de homogeneização usa integração numérica pela regra trapezoidal para calcular o vetor de fluxo térmico para um fluxo de superfície que varia espacialmente. Os resultados demonstram que o algoritmo de homogeneização proposto converge rapidamente devido à representação equivalente de energia da condição de contorno térmico. O algoritmo de homogeneização é então implementado em um modelo experimental de transferência de calor, para uma aplicação envolvendo uma placa horizontal exposta a um fogo localizado. O modelo experimental converge com os resultados obtidos pelo modelo sólido de elementos finitos, provando ser um meio preciso e eficiente para analisar estruturas com condições de limites térmicos espacialmente variáveis.

O Estudo 4 apresenta uma técnica computacional baseada no método dos elementos finitos para a resposta térmica não linear de estruturas submetidas a situações de incêndio. As equações incrementais que resultam do problema de transferência de calor não linear são resolvidas por uma técnica de solução não iterativa baseada no conceito de condutividade "*tangencial*". A eficiência computacional é ilustrada por comparação com resultados experimentais registrados durante testes de incêndio de elementos estruturais de concreto.

O Estudo 5 apresenta a aplicação de uma abordagem numérica, denotada como Programa SAAFE (Sistema de Análises Avançadas para

Engenharia de Incêndio), desenvolvida para fornecer uma análise inelástica de estruturas semirrígidas em aço-concreto sob condições de incêndio. O modelo estrutural proposto permite uma descrição precisa da resposta estrutural não linear, com menor esforço computacional quando comparado à formulação geral de elementos finitos. Os resultados obtidos para exemplos de calibração de modelos de conexão são comparados com dados experimentais relatados, mostrando concordância razoável.

O Estudo 6 apresenta o comportamento de vigas de aço sob elevação uniforme de temperatura. As vigas são carregadas sob vários níveis de carga uniformes e três condições de contorno: simplesmente suportadas (pino-rolete), simplesmente apoiadas com restrição axial (com pinos fixos) e ambas as extremidades fixas (fixas-fixas). A variação de deflexão, temperatura crítica, momento fletor, força normal e tensões, são relacionadas com a temperatura. As análises foram feitas com auxílio do programa computacional ANSYS levando-se em consideração as não linearidades materiais e geométricas e a variação de deformação com a temperatura.

O Estudo 7 apresenta o desenvolvimento de um modelo tridimensional de elementos finitos não-lineares para avaliar a resposta a incêndios em conexões estruturais. O comportamento real de dois conjuntos estruturais com conexões de duplo ângulo, expostos a diferentes cenários de incêndio, foi modelado usando o software de elementos finitos ANSYS. O modelo é validado através da comparação dos parâmetros de resposta térmica e estrutural previstos dos conjuntos de conexão com dados medidos de testes de incêndio em conjuntos reais de estrutura com e sem a laje de concreto. Os resultados dos estudos paramétricos indicam que o tipo de carga e a restrição axial têm influência significativa no desempenho transitório do fogo da montagem da estrutura. Além disso, a presença da laje de concreto aumenta significativamente a rigidez do conjunto de conexão e diminui instabilidades locais, como flambagem local e lateral que surgem nas vigas, e isso melhora o desempenho das conexões.

O Estudo 8 traz um conceito inovador chamado Metodologia dos Foguetes Viajantes Aprimorado (iTFM) que foi desenvolvido para levar em conta o comportamento não uniforme do fogo, especialmente em locais abertos. Equações são introduzidas para reduzir o alcance de possíveis tamanhos de incêndio, levando em consideração as taxas de propagação de fogo de incêndios reais. O TFM aprimorado (iTFM) é aplicado a compartimentos genéricos de concreto e aço para estudar o efeito do aquecimento não uniforme associado aos incêndios em movimento, investigando a localização da temperatura máxima ao longo do caminho do fogo. Verifica-se que é principalmente dependente da taxa de propagação do fogo e da taxa de liberação de calor. A localização da temperatura de pico no compartimento ocorre principalmente no final do caminho de fogo.

No Estudo 9 foi apresentado o desempenho das conexões de aço e sua resposta ao fogo, especialmente os incêndios incontroláveis, através do programa de elementos finitos ABAQUS. Foram desenvolvidos modelos dependentes de temperatura para diferentes tipos de conexões de aço, soldadas e parafusadas. Realizou-se a análise de Elementos Finitos de modelos experimentais selecionados para verificar a implementação destes modelos e para determinar os efeitos do calor no comportamento dos materiais nas áreas elástica e plástica. Os resultados foram notavelmente semelhantes, com muito pouco erro na resposta mecânica prevista ou nos últimos deslocamentos e modos de falha. Percebe-se que o modelo proposto está bem condicionado para prever os efeitos do fogo nas conexões de aço soldadas e aparafusadas.

O Estudo 10 apresenta a análise numérica de vigas de concreto armado com seções retangulares e em T, e de vigas mistas de aço e concreto submetidas a altas temperaturas. Para obter os resultados numéricos, referentes às relações “*momento x curvatura*” para diferentes temperaturas, bem como os valores máximos obtidos para os momentos fletores, utilizou-se o método das fibras, com as relações constitutivas dos materiais (concreto e aço)

definido pelas considerações do EUROCODE 2 parte 1.2 e pela ABNT NBR15200. A partir dos resultados obtidos, é possível identificar a resistência da estrutura à medida que aumenta o tempo de exposição ao fogo e também demonstra a redução efetiva de sua rigidez.

O Estudo 11 investiga a influência de sistemas de contraventamento com restrição (chamados de BRBs - *Buckling Restrained Brace*) na estabilidade estrutural geral contra incêndio após um incidente grave, que causou a falha de uma coluna no primeiro andar de um edifício de aço. Um modelo de quatro andares é modelado, assume-se que um evento extremo danificou uma coluna central do primeiro andar, antes da exposição a um incêndio subsequente. Os resultados indicam que os BRBs oferecem um maior tempo de colapso global ao edifício, devido à maior rigidez que eles fornecem ao quadro estrutural. A resistência ao fogo fornecida pelos BRBs é restrita à participação de elementos de contraventamento e vigas de enquadramento. Para concluir, verifica-se que os BRBs são capazes de manter a estabilidade de um edifício danificado contra o fogo resultante de um evento extremo, mostrando-se melhores que outros sistemas investigados por outros estudos.

No Estudo 12 é realizada uma avaliação do comportamento térmico de um material híbrido (FA/OPC) e de um geopolimérico (FA100). O sistema FA100 é baseado em cinzas volantes (FA), que possui um elevado teor de material não queimado (14,8%). O sistema FA/OPC é composto por uma mistura de cinza volante e cimento Portland comum (OPC) na proporção de 80/20. O desempenho térmico foi avaliado por vários testes, como exposição a altas temperaturas (até 1000°C) e resistência direta à chama. Além disso, o efeito da exposição cíclica foi estudado a 700°C por 10 ciclos. O material híbrido FA/OPC retém 92% de sua força inicial e o FA100 retém 113,3% de sua força inicial a 700°C. Ambos os materiais podem suportar 10 ciclos de exposição com uma perda de força inferior a 45%. Na exposição direta à chama, foi observado um gradiente de temperatura de cerca de 500°C. Estes

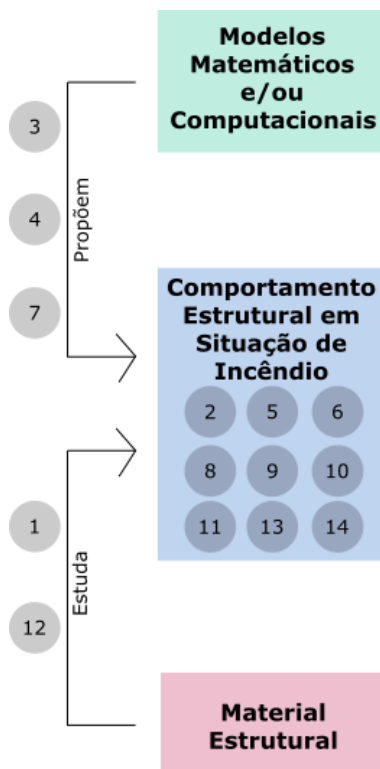
resultados indicam que estes tipos de materiais poderiam possivelmente ser usados como materiais resistentes ao fogo em elementos estruturais.

No Estudo 13 são realizadas análises para estruturas de concreto submetidas a um incêndio. Comprovou-se que o concreto é danificado nessas condições, mas se o concreto remanescente estiver sem rachaduras visíveis ou outros danos visíveis, esse concreto pode ser mantido em serviço sob cargas reduzidas para compensar a diminuição da resistência. Contudo, este concreto mostra propriedades de transporte significativamente diferentes do que a porção não danificada. Se deixado desprotegido e sem tratamento, este concreto permanece muito vulnerável a danos causados pela entrada de íons agressivos, causando mais declínio nas propriedades mecânicas.

No Estudo 14, é realizada uma investigação experimental sobre as tensões residuais pós-incêndio em seções de aço em forma de caixa soldada. Os testes são realizados pelo método de corte, e são usados dois tipos de aços: aço Q235 leve com uma tensão nominal de 235MPa e aço Q460 de alta resistência com uma tensão nominal de 460MPa. As tensões residuais foram avaliadas após a exposição das amostras a 200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C e resfriamento até a temperatura ambiente. Os dados dos testes mostram claramente que as tensões residuais diminuem significativamente com o aumento na temperatura da amostra. Além disso, os resultados dos testes são utilizados para propor relações simplificadas para tensões residuais induzidas pela temperatura na seção de caixa soldada dos aços Q235 e Q460.

Na Figura 3 é apresentado um diagrama das relações entre os estudos, abordando o comportamento das estruturas em situações de incêndio, materiais resistentes ao fogo e modelos matemáticos e/ou computacionais.

Figura 3 – Diagrama das relações entre os estudos



Fonte: elaboração própria (2020)

Os Estudos 1 e 12 mostram materiais estruturais resistentes ao fogo e seu comportamento. Os Estudos 3, 4 e 7 propõem modelos matemáticos e/ou computacionais para compreender as estruturas em situação de incêndio. Os Estudos 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13 e 14 estudam o comportamento de estruturas em situações de incêndio.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo demonstra diversas abordagens no tema estruturas em situação de incêndio, para trabalhos desenvolvidos no Continente Americano. Percebe-se que poucos materiais foram vistos nos estudos selecionados, mas a maioria das pesquisas trata de estudos sobre o comportamento estrutural em situações de incêndios, sendo que algumas compreendem modelos matemáticos e/ou computacionais que auxiliam no entendimento do



comportamento de sistemas estruturais quando sujeitos a incêndios. Ressalta-se que o estudo teve sua busca na literatura limitada pelas palavras chaves “*structure and fire*”, o que pode explicar os poucos artigos com abordagem sobre o tema “*materiais estruturais*”.

Percebe-se que este é um campo com poucas pesquisas de alto impacto no Continente Americano. Por fim, com este trabalho pôde-se identificar algumas sugestões de trabalhos futuros: para os próximos estudos, sugere-se a pesquisa de forma sistemática incluindo os materiais estruturais, bem como outra pesquisa abordando estas buscas em outros locais do mundo, como os países da Europa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C.C.; SOUZA, J.C. Projeto de arquitetura - proteção contra incêndio em elementos estruturais de aço. **Estação Científica (UNIFAP)**, v. 5, n. 2, p. 49-68, jul./dez. 2015.

ARABLOUEI, A.; KODUR, V. Cohesive zone model properties for evaluating delamination of spray-applied fire-resistive materials from steel structures. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 143, p. 138-157, 2015.

BAO, Y. et al. Temperature measurement and damage detection in concrete beams exposed to fire using PPP-BOTDA based fiber optic sensors. **Smart Materials and Structures**, v. 26, n. 10, 2017.

BEATA, P. A.; JEFFERS, A. E. Spatial homogenization algorithm for bridging disparities in scale between the fire and solid domains. **Fire Safety Journal**, v. 76, p. 19-30, 2015.

FERENHOF, Helio Aisenberg; FERNANDES, Roberto Fabiano. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SFF. **Revista ACB**, [S.l.], v. 21, n. 3, p. 550-563, dez. 2016. ISSN 1414-0594. Disponível em: <<https://revista.acbsc.org.br/racb/article/view/1194>>. Acesso em: 27 out. 2018.

KIM, J. H.; JO, S.; LATTIMER, B. Y. Feature Selection for Intelligent Firefighting Robot Classification of Fire, Smoke, and Thermal Reflections Using Thermal Infrared Images. **Journal of Sensors**, v. 2016, 2016.



KLINOFF, Robert W. **Introduction to fire protection**. Thomson learning, 2003.

HOGGE, M. A. Modelled thermal response of structures in fire environments. **Applied Mathematical Modelling**, v. 1, n. 6, p. 319-324, 1977.

LANDESMANN, A. Inelastic analysis of semi-rigid composite structures under fire conditions. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 33, n. 4, p. 483-491, 2011.

MOURÃO, H. D. R.; E SILVA, V. P. On the behaviour of single-span steel beams under uniform heating. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 29, n. 1, p. 115-122, 2007.

PAKALA, P.; KODUR, V. Effect of concrete slab on the behavior of fire exposed subframe assemblies with bolted double angle connections. **Engineering Structures**, v. 107, p. 101-115, 2016.

RACKAUSKAITE, E. et al. Improved Formulation of Travelling Fires and Application to Concrete and Steel Structures. **Structures**, v. 3, p. 250-260, 2015.

RAHNAVARD, R.; THOMAS, R. J. Numerical evaluation of the effects of fire on steel connections; Part 1: Simulation techniques. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 12, p. 445-453, 2018.

ROBERTSON, James C. **Introduction to fire prevention**. Pearson Education, 2005. 6<sup>th</sup> edition. ISBN 0-13-119031-8

ROCHA, P. A. S.; DA SILVA, K. I. Study of Beams's Performance on Fire by the Fibers Model. **Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria**, v. 33, n. 1-2, p. 65-71, 2017.

TALEBI, E. et al. Fire resistance of a damaged building employing buckling restrained braced system. **Advanced Steel Construction**, v. 14, n. 1, p. 1-21, 2018.

TORONTO INSULATION & SOUNDPROOFING. **Fireproofing Cementitious Spay-Applied**. 2014. Available at: <http://torontosoundproofing.com/nyc-fireproofing-new-york.html>. Acces date 01-08-2019.

VÁSQUEZ-MOLINA, D.; MEJÍA-ARCILA, J. M.; MEJÍA-DE GUTIÉRREZ, R. Mechanical and thermal performance of a geopolymeric and hybrid material based on fly ash. **DYNA (Colombia)**, v. 83, n. 195, p. 216-223, 2016.

VICHIT-VADAKAN, W.; KERR, E. A. Transport properties of fire-exposed concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 7, n. 3, p. 393-401, 2009.

WANG, W. et al. Experimental study on evolution of residual stress in welded box-sections after high temperature exposure. **Advanced Steel Construction**, v. 14, n. 1, p. 73-89, 2018.