

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Pedro Guimarães Muniz

Ação e Prevenção de Incêndio em Pontes e Viadutos

**São Paulo
2023**

Pedro Guimarães Muniz

Ação e Prevenção de Incêndio em Pontes e Viadutos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia.

Data da aprovação ____/____/____

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene
(Orientador)
Mestrado Habitação: Planejamento e
Tecnologia

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene (Orientador)
Mestrado Habitação: Planejamento e Tecnologia

Prof. Dr. André Luiz Scabbia (Membro)
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Prof. Dr. Paulo Fernando Araújo Silva (Membro)
Concremat Engenharia e Tecnologia

Pedro Guimarães Muniz

Ação e Prevenção de incêndio em Pontes e Viadutos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia.

Área de Concentração: Tecnologia de Construção em Edifícios - TCE

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

São Paulo
Março/2023

Ficha Catalográfica

Elaborada pelo Departamento de Acervo e Informação Tecnológica – DAIT
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

M966a

Muniz, Pedro Guimarães

Ação e prevenção de incêndio em pontes e viadutos. / Pedro Guimarães Muniz. São Paulo, 2023.
134p.

Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

1. Prevenção contra incêndio 2. Segurança contra incêndio 3. Ponte 4. Viaduto 5. Segurança estrutural 6. Segurança pós-incêndio 7. Tese I. Helene, Paulo Roberto do Lago, orient. II. IPT. Unidade de Negócios em Ensino Tecnológico III. Título

2023-26

CDU 699.81(043)

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos aqueles que contribuíram tanto de maneira direta quanto indiretamente. A minha família, aos meus colegas que fiz durante o mestrado, amigos de infância nos mais diferentes estados do Brasil, especialmente aos familiares que ficaram na minha cidade natal e ainda assim continuaram me apoiando e questionando sobre o andamento do meu aprendizado, e, também aos meus colegas de trabalho que tenho feito até aqui. Também aqueles que já não se fazem mais presentes de maneira física neste plano, a título do meu avô, Dr. Pedro Guimarães, e meu tio Juraci Guimarães, que sem dúvidas nenhuma são pra mim grande inspiração pessoal e profissional.

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof. Paulo Helene, qual de maneira usual, prestou-se a me corrigir e encaminha a conclusão deste trabalho. Também não poderia deixar de agradecer a todo a equipe que fez e faz o mestrado do IPT, aos funcionários da secretaria, em especial ao Sr. Adilson, aos professores Cláudio, Luciana, Gisleine, Maria, Ércio, Berto e André. Alguns até chegando a transitar na coordenação do curso, e que ali sempre estiveram durante toda minha jornada, que sem sobra de dúvidas, não foi uma trajetória fácil, tão logo neste período tivemos que enfrentar juntos uma pandemia do vírus COVID-19, por quase 2 anos, até que tudo pudesse voltar ao normal com saúde e segurança para que este trabalho se findasse. Meus agradecimentos aqueles que iniciaram o pensamento crítico e filosófico acerca do “normal”, que sem dúvidas nenhuma são fontes provocativas e críticas para que pudesse trazer à tona o pensamento crítico.

RESUMO

Face o desenvolvimento de estudos acerca do tema de incêndio na engenharia de estruturas, verifica-se que nos dias atuais há também uma maior necessidade de se discutir esse cenário para as Pontes e Viadutos de Concreto. Elenca-se como os principais gatilhos para este fenômeno: as habitações de caráter provisório por parte da população em situação de rua, a predominância do modal rodoviário na logística de líquido inflamáveis e também, num menor grau, as recentes mudanças climáticas globais e instalações de projetos complementares nas Pontes e Viadutos, como dutovias para gás. Verifica-se que os sistemas estruturais para Pontes e Viadutos são predominantemente em concreto e aço, sendo dois materiais com comportamentos distintos frente a ação do fogo. Inicia-se apresentando os principais centros de pesquisas e pesquisadores no cenário nacional e internacional. Faz-se uma explanação do cenário no contexto global, bem como no município de São Paulo, onde incidentes como os acontecidos no Viaduto Santo Amaro e na Ponte do Jaguaré exemplificam como um incêndio pode impactar na qualidade de vida das pessoas. Para o cenário internacional cita-se o que dezessete autores internacionais vêm discutindo sobre o tema na atualidade. Dessa forma, para balizamento e entendimento geral do contexto apresenta-se, por se fazer necessário entender os conceitos básicos de fogo, tipos de ensaios para determinação de reação e resistência ao fogo, ensaios para avaliação da estrutura no concreto e no aço pós-incêndio, as principais consequências do fogo para os materiais de concreto, manutenção e gestão desses ativos, bem como as considerações finais e sugestões de pesquisas futuras.

Palavras-chave: Incêndio. Pontes. Viaduto. Concreto.

ABSTRACTS

Action and Prevention of Fire in Bridges and Viaducts

Given the development of studies on the subject of fire in structural engineering, it can be seen that nowadays there is also a greater need to discuss this scenario for concrete bridges and viaducts. The main triggers for this phenomenon are: temporary housing by the homeless population, the predominance of roads in the logistics of flammable liquids and also, to a lesser extent, the recent global climate changes and the installation of complementary projects in Bridges and Viaducts, such as gas pipelines. The structural systems for bridges and viaducts are predominantly in concrete and steel, two materials with distinct fire behaviors. The main research centers and researchers in the national and international scenario are presented in the work. An explanation of the global scenario is made, as well as in the city of São Paulo, where incidents like the ones that happened in the Santo Amaro Viaduct and in the Jaguaré Bridge exemplify how the phenomenon impacts on people's quality of life. For the international scenario, seventeen international authors have been discussing the theme today. Thus, for general understanding of the context it is presented, as it is necessary to understand the basic concepts of fire, types of tests to determine reaction and resistance to fire, tests to evaluate the structure in concrete and steel after fire, the main consequences of fire for concrete materials, maintenance and management of these assets, as well as the final considerations and suggestions for future research.

Keywords: Fire. Bridges. Viaduct. Concrete.

Lista de Ilustrações

Figura 1 -	Representação do grande incêndio de Roma 64d.C'	18
Figura 2 -	Representação do grande incêndio de Londres 1666	19
Figura 3 -	Ação de combate ao incêndio que atinge um Viaduto habitado pela população em situação de rua na cidade de Austin, Texas (2021)	23
Figura 4 -	Exposição de Ponte ao incêndio com conseqüente explosão devido acidente com caminhão na Rodovia próximo a cidade de Caçapava, SP	23
Figura 5 -	Incêndios florestais acometem Pontes e Viadutos em região urbana da Itália e Grécia	24
Figura 6 -	Ação do fogo e colapso de vão (28m) devido ao armazenamento de tubulação combustível no Viaduto da Rodovia (I-85), Geórgia, EUA (2017).	25
Figura 7 -	Instalação complementar de gás presente da face inferior da laje em balanço do Viaduto Austregésilo de Athayde na capital de São Paulo.	26
Figura 8 -	A equipe de laboratório resfriando um conjunto de parede em chamas no forno de parede de 3,0m x 3,6 metros, após a conclusão de um teste de fogo.	31
Figura 9 -	Principais fases de um incêndio	36
Figura 10 -	Representação da reação em cadeia da combustão.	37
Figura 11 -	Representação dos mecanismos de transferência de calor: radiação, convecção e condução.	38
Figura 12 -	Realização de ensaio de Reação ao fogo dos materiais no laboratório de incêndio e explosões do IPT	40
Figura 13 -	Realização de ensaio de ignitabilidade em superfície do corpo de prova no laboratório de incêndio e explosões do IPT.	41
Figura 14 -	Preparo do ensaio de determinação do comportamento com relação à queima utilizando uma fonte radiante de calor, IPT.	41
Figura 15 -	Diferença de temperatura na superfície do teto x piso.	42
Figura 16 -	Curva da temperatura no elemento estrutural com base no incêndio natural.	45
Figura 17 -	Curva da temperatura no elemento estrutural com base na curva de incêndio padrão.	46

Figura 18 -Fases de um incêndio	46
Figura 19 -Representação do “backdraft” após interação intencional de oxigênio	48
Figura 20 -Estrutura protegida por argamassa projetada	52
Figura 21 -Estrutura com proteção em fibra projetada	52
Figura 22 -Estrutura revestida por placas em silicato de cálcio	53
Figura 23 -Danos causados pelo fogo humano a utilidades sensíveis sob pontes e detalhe após a instalação da manta de incêndio no local após evento	53
Figura 24 -Comportamento ao fogo em uma estrutura protegida por pintura intumescente, aspecto antes, durante e depois da ação do fogo.	54
Figura 25 -Alargamento de pilares vulneráveis a ação de moradores em situação de rua no complexo Lagoinha em Belo Horizonte - MG.	55
Figura 26 -Fluxograma sugerido para desenvolvimento de análise de riscos	56
Figura 27 -Fator de redução da resistência do concreto	58
Figura 28 -Comportamento previsto do concreto em função do acréscimo na sua temperatura	59
Figura 29 -Flambagem combinada ao deslocamento explosivo em pilar acometido pelo fogo	61
Figura 30 -Decorrência de “spalling” mediante as interações internas do concreto acometido pelo fogo.	62
Figura 31 -Formação da pasta de cimento e representação das suas porções constituintes	64
Figura 32 -Processo de Fadiga do concreto devido a incompatibilidade térmica entre o agregado e a pasta de cimento durante situação de incêndio.	66
Figura 33 -Fator de redução de resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura	67
Figura 34 -Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em função da temperatura.	68
Figura 35 -Fator de redução de resistência do aço de armadura ativa em função da temperatura	69
Figura 36 -Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura ativa em função da temperatura	70

Figura 37 -Extinção e controle de incêndio através de jatos pressurizados de água em Viaduto acometido pelo fogo.	71
Figura 38 -Extinção e controle de incêndio através de extintores em Viaduto acometido pelo fogo.	72
Figura 39 -Constatação da deformação do aço de armadura principal e seccionamento dos estribos dos pilares em um viaduto durante inspeção extraordinária devido a ação do fogo	73
Figura 40 -Representação das estradas Romanas	74
Figura 41 -Evolução dos sistemas estruturais em Pontes	75
Figura 42 -Ponte pré-histórica e bi-apoiada em pedra denominada “Tarr Steps”.	75
Figura 43 -Subsistemas que compõe uma Ponte ou Viaduto	78
Figura 44 -Representatividade para cada tipologia estrutural dentre os diversos sistemas estruturais existentes para Pontes e Viadutos	79
Figura 45 -Ocorrências de deslocamentos explosivos em face Inferior de uma Ponte com elevada abrangência de armaduras exposta que estavam embutidas no concreto.	79
Figura 46 -Taxa aproximada para ocupação de Pontes e Viadutos no Município de São Paulo	95
Figura 47 -Elevada deterioração em laje em balanço acometida pela ação do fogo no Viaduto Min. Aliomar Baleeiro, bairro Saúde.	96
Figura 48 -Detalhe da laje em balanço acometida pela ação do fogo no Viaduto Min. Aliomar Baleeiro	97
Figura 49 -Localização das Pontes e Viadutos atingidos pela ação do Fogo. Ponte do Jaguaré posicionada mais a Noroeste do Mapa e o Viaduto Santo Amaro mais ao Sul.	98
Figura 50 -Observa-se a condição encontrada no vão três. A esquerda, verifica-se a armadura ativa exposta e na direita observam-se pontos da retirada de testemunhos de concreto para ensaios.	99
Figura 51 -Condição visual da Face Inferior do Viaduto Santo Amaro onde o vão foi atingido pelo fogo	100
Figura 52 -Presença de reforços de fibras de carbono não protegidos atingidos pela ação do fogo no Viaduto Santo Amaro.	101
Figura 53 -Conflagração em habitações por parte da população em situação de rua atinge Ponte do Jaguaré em 2019	102
Figura 54 -Vista do Tabuleiro Superior durante o incêndio na Ponte	103

do Jaguaré. Verifica-se o comportamento de uma junta de dilatação defeituosa mediante a ação do fogo

Figura 55 -	Configuração usual para juntas de dilatação em Pontes e Viadutos conforme verificados no Viaduto Antônio Abdo, Zona Leste de São Paulo	104
Figura 56 -	Vista de um aparelho de apoio – AA, em neoprene fretado atingido pela ação de um incêndio em um viaduto no Rodoanel - SP.	105
Figura 57 -	Viaduto Arapuã na Av. Bandeirantes sentido ABC Paulista. Observa-se a pintura executada sob o deslocamento explosivo do concreto pré-existente.	106
Figura 58-	Diferentes pilares acometidos pelo Fogo em ação Pontual no Viaduto Governador Roberto Abreu Sodré, Região central de São Paulo	107
Figura 59 -	Diferentes pilares acometidos pelo Fogo em ação Pontual na Ponte Jurubatuba na Av. Interlagos, Zona Sul de São Paulo.	107
Figura 60 -	Medidas de resfriamento de pilar de concreto armado após a ocorrência de incêndio de grandes proporções	109
Figura 61 -	Deteção da posição e do cobrimento da armadura embutida no concreto	111
Figura 62 -	Ficha exemplo para registro de dados obtidos no ensaio de “pacometria” qual está definido o cobrimento mínimo de 6cm.	111
Figura 63 -	Esquemático dos componentes e aplicação do esclerômetro de reflexão	112
Figura 64 -	Características do esclerômetro digital com painel de resultado final integrado	112
Figura 65 -	Realização do ensaio de ultrassom em viga de concreto armado através do método direto	113
Figura 66 -	Correlação existente entre as velocidades captadas de propagação linear e a qualidade do concreto ensaiado	113
Figura 67 -	Verificação no painel do resultado obtido no ensaio do potencial elétrico de corrosão em viga de concreto armado	114
Figura 68 -	Correlação existente entre o potencial e a probabilidade de corrosão	114
Figura 69 -	Verificação do resultado obtido no dispositivo “resipod” determinando o valor de resistividade de 14.7 KΩ x cm	115
Figura 70 -	Representação da correlação existente entre o potencial e	115

	a probabilidade de corrosão	
Figura 71 -	Aspersão da solução de fenolftaleína para verificação das espessuras máximas e mínimas de carbonatação do Concreto	116
Figura 72 -	Ficha exemplo para coleta de dados referente ao ensaio de carbonatação do concreto para uma estrutura de 40 anos de idade	116
Figura 73 -	Termograma com as curvas de ATD/TG de amostra de concreto	117
Figura 74 -	Porção interna de amostra de concreto em relação a face exposta ao fogo, observada em MEV, onde a presença de cristais aciculares de etringita indica que amostra não superou 100 °C durante o incêndio	118
Figura 75 -	Trechos de laje em balanço e pilar recolhidos dos escombros do Edifício Wilton Paes de Almeida para ensaios.	119
Figura 76 -	Fluxo sugestivo para Inspeção de risco ao fogo em Pontes e Viadutos	120
Figura 77 -	Pirâmide apresentando o mais recomendado procedimento de proteção a partir da MATRIZ de escolha - Argamassa com Fibras Sintéticas	123
Gráfico 1 -	Configuração Tempo x Elevação da Temperatura de acordo com a ISO 834.	43
Gráfico 2 -	Curva padrão temperatura-tempo – Edificações x Hidrocarbonetos x Túneis	44
Gráfico 3 -	Histórico de gastos com manutenção de Pontes e Viadutos no município de São Paulo	108
Quadro 1 -	Potenciais caloríficos dos materiais do eurocode	47
Quadro 2 -	Sistemas de proteção passiva	49
Quadro 3 -	Comportamento de diferentes tipos de materiais de construção frente a ação do fogo.	57
Quadro 4 -	Transformações do Concreto submetido as altas temperaturas	59
Quadro 5 -	Comportamento do Concreto submetido as altas temperaturas.	60
Quadro 6 -	Métodos cautelosos a serem considerados para o concreto contra “spalling” e perda de resistência.	63

Quadro 7 -	Parâmetros de classificação das Pontes e Viadutos	76
Quadro 8 -	Visão geral dos cadastros de Pontes e Viadutos feito em Sistemas de Gerenciamento de Pontes no Brasil e Europa.	87
Quadro 9 -	Revisão Bibliográfica do tema estudado sobre o risco de incêndio em Pontes e Viadutos (todos os tipos)	89
Quadro 10 -	Parâmetros para classificação ponderada na avaliação de risco de incêndio em Pontes e Viaduto com atribuição de diferentes pesos	92
Quadro 11 -	Literatura que aborda a ação excepcional do fogo nas estruturas de pontes e viadutos	92
Quadro 12 -	Incêndios ocorridos em Pontes e Viadutos no Município de São Paulo devido a ação do fogo por ocupação da população em situação de rua	95
Quadro 13 -	Composição do Viaduto Santo Amaro	99
Quadro 14 -	Ensaio e observações feitas pós-incêndio no Viaduto Santo Amaro	100
Quadro 15 -	Comportamento ao Fogo de outros materiais aplicáveis para Pontes e Viadutos	105
Quadro 16 -	Caracterização da armadura acometida pelo fogo no pós-incêndio do edifício Wilton Paes de Almeida, Município de SP.	119
Quadro 17 -	Matriz de Decisão para escolha do sistema de proteção das estruturas de concreto em Pontes e Viadutos sujeitas a ação Fogo.	122

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Grandes incêndios brasileiros até 2021

20

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPP	Associação de Proteção Passiva contra Incêndios
ALBRASCI	Associação Luso-Brasileira para a Segurança Contra Incêndio
ATD/ATG	Análises Termodiferencial e Termogravimétrica
BRE	<i>Building Research Establishment Limited</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CEB	<i>Comitê Europeu do Concreto</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
EUA	Estados Unidos da América
IBMB	<i>Institute of Building Materials Concrete Construction and Fire Protection</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITT	Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil –
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBI	<i>National Bridge Inventory</i>
NFPA	<i>The National Fire Protection</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NRCC	<i>National Research Council of Canada</i>
RRIS	<i>Rise Research Institutes of Sweden</i>
SGO	Sistema de Gerenciamento de Obras de Artes especiais –
SGP	Sistema de Gerenciamento de Pontes
SINTEF NBL	<i>Norwegian Fire Research Laboratory</i>
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

VSH

Hagerbach Test Gallery Ltda

SUMARIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Importância do Tema e objetivos	18
1.2 Centros de Pesquisa no Brasil e no Exterior	27
1.2.1 <i>Building Research Establishment Limited</i> – BRE	27
1.2.2 <i>Hagerbach Test Gallery Ltda</i> – VSH	28
1.2.3 <i>Institute of Building Materials Concrete Construction and Fire Protection</i> – IBMB	29
1.2.4 <i>National Institute of Standards and Technology</i> – NIST	29
1.2.5 <i>Norwegian Fire Research Laboratory</i> – SINTEF NBL	30
1.2.6 <i>National Research Council of Canada</i> – NRCC	30
1.2.7 <i>Rise Research Institutes of Sweden</i> – RRIS	31
1.2.8 Laboratório de Segurança ao Fogo (LSF) do IPT	32
1.2.9 Laboratório de Segurança Contra Incêndio (LSCI) da UNISINOS	32
1.3 Pesquisadores	32
1.4 Conteúdo desta Dissertação	34
2 CONCEITOS BÁSICOS DO FOGO	36
2.1 Mecanismos de transferência de calor	37
2.2 Reação e Resistência ao fogo	39
2.2.1 Reação ao fogo	39
2.3 Curvas padrão de Temperatura e fases do incêndio	43
2.4 Proteção contra o fogo	48
2.4.1 Medidas de proteção passiva	48
2.4.2 Medidas de proteção ativa	49
2.4.3 Alguns materiais e métodos de proteção ao fogo para estruturas	50
2.5 Análise de risco em um cenário de incêndio estrutural	55
3 ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	57
3.1 Concreto	57
3.1.1 O fenômeno do “ <i>spalling</i> ”	61
3.1.2 Efeito do fogo na pasta hidratada de cimento	64
3.1.3 Efeito do fogo nos agregados	65
3.2 Aço	66
3.2.1 Armadura Passiva	66
3.2.2 Armadura Ativa	69

3.3 Métodos de resfriamento pós-incêndio	71
4 PONTES	74
4.1 Classificação das Pontes e Viadutos	76
4.1.1 Superestrutura	80
4.1.2 Mesoestrutura	80
4.1.3 Infraestrutura	81
4.1.4 Elementos principais, secundários e complementares	81
5 INSPEÇÕES DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS	83
5.1 Inspeções (ABNT NBR 9452:2019)	83
5.1.1 Inspeção Cadastral	84
5.1.2 Inspeção Rotineira	85
5.1.3 Inspeção Especial	85
5.2 Conceito básico sobre gerenciamento de Pontes e Viadutos	86
5.3 Estado da Arte: incêndio em Pontes e Viadutos no cenário internacional	88
5.4 Estado da Arte: incêndio em Pontes e Viadutos no Município de São Paulo	94
5.4.1 Acidentes Estruturais: Incêndio no Viaduto Santo Amaro e Ponte do Jaguaré	97
5.4.1.1 Caso 1: Incêndio no Viaduto Santo Amaro	98
5.4.1.2 Caso 2: Incêndio na Ponte do Jaguaré	102
5.4.1.3 Outras Pontes e Viadutos acometidas pelo fogo no Município de São Paulo	106
5.5 Avaliação de danos pelo incêndio: inspeção e ensaios realizáveis	109
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	120
6.1 Conclusões Propriamente ditas	120
6.2 Transferência do Conhecimento	123
6.3 Sugestões a Pesquisas futuras	124
REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO

As pontes e viadutos são elementos cruciais para a mobilidade urbana e rodoviária, permitindo o fluxo de veículos e pedestres em áreas urbanas e interligando regiões. Apesar da durabilidade e resistência do concreto, que é comumente utilizado na construção dessas estruturas, elas ainda estão sujeitas a diversos riscos, incluindo incêndios.

1.1 Importância do Tema e Objetivos

Os danos provocados pelas ações dos incêndios, usualmente acarretam cenários destrutivos, principalmente quando descontrolados. Esses acontecimentos vêm sendo discutidos durante séculos, principalmente para edificações, mas que para os dias atuais, verifica-se uma necessidade de se pautar também para estruturas como Pontes e Viadutos, tendo em vista quem afetam diretamente a sociedade em questão. Ambos fenômenos tem um efeito reativo acarretando adaptações ou instauração de regulamentações técnicas e legais a fim de se evitar sua recorrência. Portanto pode-se considerar que se tratam de acontecimentos que proporcionam oportunidades para o aprendizado no que tange a ações corretivas e preventivas.

Dentro desse contexto, segundo Fernandes (2021) tem-se como grande exemplo das consequências do incêndio descontrolado que acometem a sociedade, um dos maiores incêndios da antiguidade, historicamente conhecido como o “grande incêndio de Roma” (Figura 1), ocorrido no império Romano durante o reinado do Imperador Nero, catástrofe datada do ano de 64 d.C.

Figura 1 - Representação do grande incêndio de Roma 64d.C

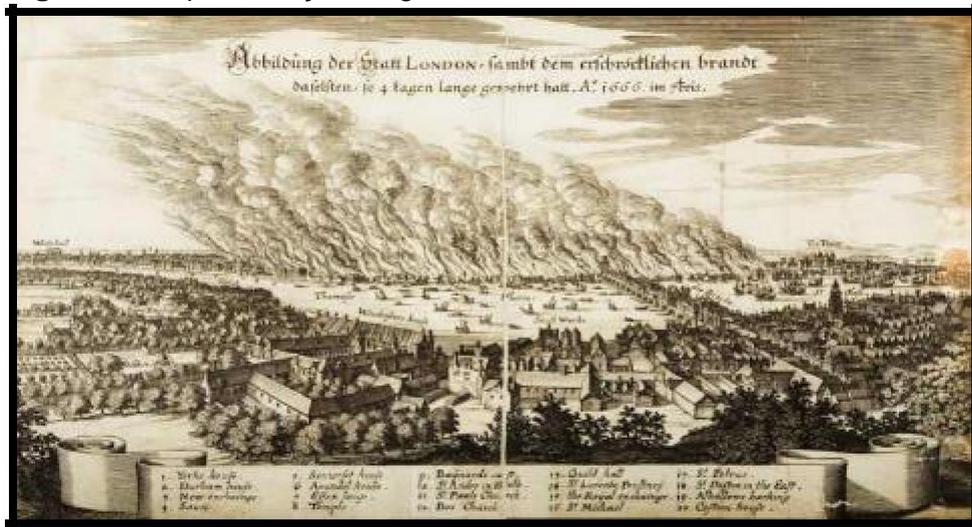


Fonte: Fernandes (2021).

Estima-se que o incêndio supracitado, mediante sua grandiosidade e duração de três dias, provocou não só a morte de centenas a milhares de romanos, mas também atingiu a rotina e qualidade de vida das pessoas mediante a destruição de centenas de moradias e de importantes infraestruturas existentes naquela sociedade.

Outro grande evento, a exemplo mundial da ação excepcional do fogo descontrolado aconteceu em Londres, em setembro do ano de 1666. Segundo London Fire Brigade (2021), a região central da cidade perdeu aproximadamente 80% da sua área (Figura 2). Ao fim, o incêndio durou aproximadamente 4 dias, atingiu 13.200 casas numa área 2 km² devastada deixando cerca de 100 mil desabrigados.

Figura 2 - Representação do grande incêndio de Londres 1666



Fonte: London Fire Brigade (2021).

Segundo London Fire Brigade (2021), o prejuízo da devastação gira no entorno de 10 milhões de euros, incluindo-se construções históricas como catedrais construídas na idade média. Não obstante, reativamente formaram-se as primeiras brigadas contra incêndio conhecidas da era moderna.

Em ambos os eventos, o fogo se apresenta com protagonismo de cenários devastadores que foram capazes, inclusive de rever padrões e ações relativas aos costumes da época, melhorando diretamente em aspectos de segurança contra incêndio. Naquelas circunstâncias, identificam-se que as principais características de propagação do fogo, foram os materiais combustíveis empregados nas antigas arquiteturas das casas (material combustível), a impossibilidade de fuga devida as disposições geométricas das casas e das ruas e a reação em cadeia devido as proximidades entre as moradias sem compartimentação (distanciamento seguro

ineficiente).

Limitando-se ao Brasil, os principais registros da manifestação do fogo às pessoas e estruturas, teve marco inicial na data de 1961, conforme apresentado na Tabela 1, onde elenca-se também as datas dos principais incêndios dentro do território brasileiro.

Tabela 1 - Grandes incêndios brasileiros em edificações, pontes e viadutos até 2021.

Local	Estado	Ano
<i>Gran Circus</i> Norte Americano	Rio de Janeiro	1961
Edifício Andraus	São Paulo	1972
Edifício Joelma	São Paulo	1974
Boate <i>Kiss</i>	Rio Grande do Sul	2013
Museu da Língua de Portuguesa	São Paulo	2015
Passarela sobre a Linha Amarela	Rio de Janeiro	2016
Museu Nacional do Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	2018
Edifício Wilton Paes de Almeida	São Paulo	2018
Viaduto de acesso à Linha Vermelha	Rio de Janeiro	2019
Viadutos: Bresser, Jaguaré e Alcântara Machado	São Paulo	2019

Fonte: Adaptado pelo autor com dados de Pereira (2020), Berto (2020) e Ippolito, Costa e Beltrame (2021).

Considerando os acontecimentos, bem como o medo perante a expectativa de recorrência dos fatos, viabilizaram-se estudos e medidas que representam melhorias relativas à prevenção, combate e segurança das estruturas em situação de incêndio.

Nesse sentido, após os incêndios ocorridos nos edifícios Andraus e Joelma, pioneiramente surgiram no Brasil as primeiras fortes manifestações de legislações com foco na segurança contra incêndio, que no período, vislumbravam fundamentalmente a vida das pessoas, não contemplando muito sobre infraestruturas como Pontes ou Viadutos, nem levando-se em conta a sua durabilidade. Pode-se

elencar como marcos nesse período, segundo Pereira (2020):

- a) Decreto estadual nº 10.878 – Rio de Janeiro – Publicação no ano de 1974;
- b) ABNT NB 208 – Saídas de emergências para edifícios altos - no ano de 1974;
- c) Estruturação do corpo de bombeiros de São Paulo, focado na prevenção contra incêndio - 1975;
- d) NR-23 de Proteção contra incêndio pelo do ministério do trabalho – no ano de 1978;
- e) Publicações de normas específicas para incêndios pela ABNT – no ano de 1980, como a NBR 5627 apresentando exigências particulares das obras de concreto armado;
- f) Homologação pela ABNT do Comitê Brasileiro de Segurança Contra Incêndio, o CB/024 – no ano de 1990. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1990)

Outros países também sofriam com as ações excepcionais do fogo ao fim do século XXI, como é o caso do Estados Unidos da América – EUA. Dessa forma, verificaram-se lançamentos de manuais com recomendações para combater incêndio, bem como a fundação da “*The National Fire Protection – NFPA*” no ano de 1896. Pode-se elencar também nesse período, importantes estudos com a finalidade de atender aos inspetores de seguros da época voltados para edificações e outros tipos de estruturas como galpões, embora de ordem privada, contribuem democraticamente para o estado da arte. (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2014)

Destaca-se o ano de 1975, devido o lançamento do primeiro importante documento normativo acerca do tema que envolve a segurança das estruturas contra incêndio nas estruturas, o decreto Municipal de São Paulo, Lei Nº 8.266 – Art. 92 – Constando que: “Para o efeito da segurança contra incêndio, os elementos componentes da estrutura de sustentação do edifício e da escada de segurança deverão ter resistência ao fogo de 4 (quatro) horas, no mínimo” (SÃO PAULO, 1975).

Em seguida, no ano de 1980, publica-se a norma ABNT NBR 5627 - “Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo – Procedimento”. Atualmente a norma está superada.

No ano de 2001, publicou-se a normativa brasileira que trata de questões como as exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos e

compartimentação das edificações ABNT NBR 14432: 2001 - “Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento”.

Outrora, ao passo que se evoluíam as legislações voltadas para segurança contra incêndio das estruturas, mais voltadas para edificações, mais especificamente relacionado ao objeto Pontes e Viadutos, o tema relacionado a ainda se encontra incipiente no Brasil. Mediante pesquisa bibliográfica consultada, verifica-se que essa é uma realidade que também se aplica ao exterior.

Nicoletta, Kotsovinos e Gales (2020), corroboram que as Pontes, viadutos e passarelas são infraestruturas críticas, onde os danos estruturais e interdições devido a ação do fogo são substanciais para a cotidiano da sociedade.

Dada a importância que essas estruturas proporcionam no dia a dia, percebe-se nos últimos anos que há uma potencialização dos diferentes fatores que possibilitam o acometimento dessas estruturas ao fogo, sendo:

- a) Habitação por parte da População em Situação de Rua;
- b) Acidentes e Incidentes da Logística de Caminhões Tanques;
- c) Incêndios florestais devido as mudanças Climáticas Globais;
- d) Cessão para finalidades inicialmente não concebidas;
- e) Infraestruturas complementares instaladas simbioticamente.

É notável que mediante a pandemia global vivida neste século (COVID 19) países têm crescido de população que vivem em situação de rua Montferre (2022), em função de fatores ligados diretamente as condições socioeconômicas promovidas pela crise global. Há também motivos geopolíticos a exemplo de países Europeus, a exemplo da França e Alemanha, que recebem uma grande quantidade de imigrantes devido a conflitos em países próximos. Dada a situação, surge uma demanda por habitação nos países de destino, geralmente não suprida, que acarreta a implantação de habitações provisórias sob as Pontes e Viadutos.

Dessa forma, apresenta-se as características visuais dos efeitos de uma conflagração proveniente de acampamento provisório sob uma Ponte e Viaduto em concreto no estado do Texas, Estados Unidos da América – EUA (figura 3).

Figura 3 - Ação de combate ao incêndio que atinge um Viaduto habitado pela população em situação de rua na cidade de Austin, Texas (2021)



Fonte: Leone (2021)

A ação do fogo atingiu os elementos contidos sob o respectivo viaduto, dada a queima descontrolada dos diversos materiais combustíveis presentes no acampamento, nesse caso não houve a sua interdição para uso.

Verifica-se também que a frota de veículos tem crescido nas últimas décadas, relacionando-se a um maior consumo de combustível, qual potencializa a frequência da matriz logística deste insumo que é majoritariamente rodoviária em países como Brasil. Portanto, interpreta-se que o tráfego de caminhões de carga são riscos para Pontes e Viadutos (Figura 4).

Figura 4 - Exposição de Ponte ao incêndio com conseqüente explosão devido acidente com caminhão na Rodovia próximo a cidade de Caçapava, SP



Fonte: Acervo pessoal

Nesse caso, o caminhão envolvido no acidente realizava o transporte de carga e perdeu o controle, em seguida entrou em conflagração onde atingiu a ponte em questão com atuação direta do fogo nos elementos estruturais de concreto. Houve interdição temporária para seu uso mediante avaliação especializada, prevista na normatização brasileira (ABNT NBR 9452) para mensurar os impactos do fogo na estrutura e liberação para uso pós parecer técnico. Assim, há uma maior confiabilidade quanto a segurança para retomada do seu uso e conseqüentemente tráfego de veículos.

Diante das mudanças climáticas e o conseqüente acréscimo na temperatura global, verifica-se que há um aumento dos focos de incêndios florestais (Figura 5). Neste caso, pode-se atribuir uma maior atenção para Pontes e Viadutos nas mediações, tanto de zonas rurais, quanto urbanas, desde que haja a presença de densa vegetação.

Figura 5 - Incêndios florestais acometem Pontes e Viadutos em região urbana da Itália e Grécia



Fonte: Castelfranco (2021).

O conjunto de Pontes e Viadutos acometidos pelo fogo e mostrado na Fig.5, situa-se em trecho usualmente denominado como “cinturão verde urbano” na cidade de Sicília. Nesse caso, o principal motivo para o incêndio foi uma grande quantidade de dias sem chuva associado a temperaturas diárias nas faixas dos 45 graus. Com isso, ignizaram-se o permanente material combustível da mata. Ressalta-se ainda que as habitações mais próximas da zona incendiada tiveram de evacuar suas residências por questões de segurança e saúde.

Outro grande risco de acometimento das Pontes e Viadutos ao fogo é a cessão de uso das suas áreas cobertas. A exemplo desta problemática, só no município de São Paulo o debate já perdura mais de 20 anos, tendo seu debate iniciado em 1994 segundo Rádio e Televisão Record S.A (2019). De acordo com último levantamento da prefeitura, a cidade de São Paulo possui 62 viadutos e pontes numa área de 290 mil m² de espaço público, dos quais 175 mil m² são cobertos. Portanto, um grande atrativo numa cidade onde os terrenos para ocupação se encontram cada vez mais escassos. Dessa forma, deve-se debater ainda mais qual a melhor maneira de ocupar e quais são as possíveis medidas de segurança contra incêndio que devem ser tomadas nessas cessões de uso ou armazenamento de ativos.

Corrobora-se a questão com um evento conhecido no Exterior na Rodovia Interestadual (I-85), Georgia nos EUA (Figura 6). Nesse caso foi resignado, pelo órgão responsável, o armazenamento de materiais e tubulações de plástico de alta densidade sob um importante Viaduto interestadual. No entanto, os materiais ali armazenados entraram em chamas devido uma ação criminosa, ocasionando sérios danos às estruturas do viaduto, onde, inclusive houve o colapso de um dos vãos devido a ação descontrolada do fogo.

Figura 6 - Ação do fogo e colapso de vão (28m) devido ao armazenamento de tubulação combustível no Viaduto da Rodovia (I-85), Geórgia, EUA (2017).



Fonte: National Transportation Safety Board (2017)

Diante os problemas encontrados nesse campo, as tratativas geralmente dadas, ocasionalmente são rasas e não levam em considerações diversos fatores em

acordo com apontamentos supramencionados (figura 6). Segundo Nicoletta, Kotsovinos e Gales (2020), projetos resilientes com conceitos de robustez de Pontes e Viadutos contra a ação do fogo, objetivam principalmente limitar os danos e garantir o retorno da capacidade de pico operacional em um menor período após a ocorrência desse tipo de fenômeno.

A presença de instalações complementares de gás em Pontes e Viadutos, é também sem dúvida nenhuma um risco a ser considerado. Verifica-se que esse tipo de cultura é predominante em algumas capitais brasileiras que dispõe desse tipo de serviço. É usual observar a presença de instalações complementares de gás em Pontes e Viadutos no município de São Paulo (Figura 7).

Figura 7 – Instalação complementar de gás presente da face inferior da laje em balanço do Viaduto Austregésilo de Athayde na capital de São Paulo.



Fonte: Acervo pessoal

No caso da figura supramencionada, verifica-se inclusive a presença de moradores em situação de rua, portanto nesses casos, sendo uma situação onde o risco é ainda maior para o incêndio. Verifica-se que essa e as demais realidades supracitadas se dão por conta de mudanças nos cenários socioculturais qual essas estruturas inicialmente não foram previstas.

O objetivo deste trabalho é coletar e sintetizar informações sobre os efeitos do fogo em estruturas de concreto, avaliar as causas e as consequências dos incêndios em pontes e viadutos de concreto, identificar as medidas preventivas e de proteção

contra incêndios que podem ser adotadas, bem como examinar as técnicas e métodos disponíveis para avaliar a integridade estrutural de uma ponte ou viaduto após um incêndio, considerando também parâmetros de durabilidade do concreto.

Identificam-se também possíveis lacunas no conhecimento existente sobre o assunto, e fornece uma base teórica para a tomada de decisões e orientações sobre pesquisas futuras sobre incêndios em pontes e viadutos de concreto. Além disso, reúne informações valiosas para engenheiros, arquitetos, gestores de infraestrutura, bombeiros e outros profissionais envolvidos na segurança das estruturas civis.

1.2 Centros de Pesquisa no Brasil e no Exterior

Tratando-se dos principais centros de pesquisa no Brasil e no exterior relacionado a testes e ensaios laboratórios que envolvem a ação do fogo e a segurança contra o incêndio, explana-se na presente seção, seus respectivos nomes, bem como uma breve apresentação das atribuições e outros detalhes importantes para cada sujeito. Verifica-se que em função dos altos custos de implantação, operação e manutenção dos laboratórios dedicados ao fogo, que no Brasil ainda se caminha a passos curtos.

A seguir apresenta-se um breve resumo dos principais centros de pesquisa e laboratórios de incêndio no exterior e no Brasil.

Apresenta-se no exterior os principais centros de pesquisa, onde conseqüentemente há um maior investimento financeiro para realização de testes e ensaios laboratoriais quanto ao comportamento das estruturas e materiais frente a ação do fogo. Elenca-se nos tópicos seguintes, os principais centros de pesquisas, bem como suas principais atribuições relacionadas ao tema do fogo.

1.2.1. *Building Research Establishment Limited* – BRE¹

Este instituto Britânico é capacitado para desenvolver estudos, treinamentos, ensaios e pesquisas na área de avaliação de riscos, proteção ativa e seus componentes, proteção passiva e seus componentes, bem como de desempenho estrutural das edificações em escala real, dentre outros (citação).

¹ *Building Research Establishment Limited* – BRE. England. Disponível em: www.bre.co.uk. Acesso em 27 maio 2022

A instituição promove cursos específicos, com certificação, com duração de até cinco dias com objetivo de:

- a) entender o processo de avaliação do risco de incêndio;
- b) entender os deveres das legislações;
- c) realizar avaliações de risco de incêndio e compilar relatórios abrangentes e relevantes sobre avaliação de risco de incêndio;
- d) calcular os níveis de ocupação e entender os requisitos dos meios de fuga e de compartimentação;
- e) entender sobre os detalhamentos do sistema de alarme de incêndio, a provisão de iluminação de emergência e os equipamentos de combate a incêndio.

1.2.2 *Hagerbach Test Gallery Ltda – VSH*²

Este instituto Suíço é uma companhia do grupo AMBERG, fundado em 1970, trata-se de de uma planta subterrânea constituída por laboratórios. Inicialmente desenvolvido com foco para testes e ensaios em túneis, além disso, hoje também realiza importantes eventos e treinamentos onde sua expertise é focada em desenvolver qualquer tipo de ensaio que produza barulho, impacto, fumaça, fogo e calor. A respeito da ação do fogo, seu departamento testa e ensaia o desempenho de detecção de fumaça e fogo, sistemas de extinção de incêndio, resistência e comportamento dos materiais acometidos pela ação fogo.

Diferenciais da instituição e Ensaios:

- a) testa a resistência ao fogo de acordo com as normas Europeias EN 1363-1 e 1365-2;
- b) testa a resistência ao fogo no Concreto;
- c) realiza ensaios específicos sob demanda para Resistência ao fogo em Materiais. Observa-se que a empresa de químicos para construção civil MC-Bauchemie distribui atualmente no Brasil uma argamassa estrutural com resistência ao fogo, ensaiada e testada pela instituição, denominada Nafufill KM 250, de classe de resistência F120 (120 minutos de resistência ao fogo);

² *Hagerbach Test Gallery Ltda – VSH*. Suíça. Disponível em: hagerbach.ch/. Acesso 27 maio 2022

d) expertise para Proteção ao Fogo em diferentes curvas de incêndio-padrão.

1.2.3 *Institute of Building Materials Concrete Construction and Fire Protection – IBMB*³

O instituto Dinamarquês é composto por quatro divisões: materiais de construção, construção em concreto, segurança contra incêndio e materiais orgânicos, onde este último, tem recentemente dado ênfase para materiais a base de madeira. A instituição desenvolveu duas importantes pesquisas, como: a determinação da condutividade térmica do concreto para a versão final 07/02 do Eurocode EN 1992-1-2, comparando temperaturas medidas e calculadas; e o Guia de projeto estrutural para concreto, concreto armado, concreto em caso de incêndio teste em escala real de blocos de concreto armado carregados.

1.2.4 *National Institute of Standards and Technology – NIST*⁴

Este instituto Norte Americano possui uma divisão dedicada, onde desenvolve pesquisas sobre incêndio no laboratório de construção e fogo (*Building and fire research laboratory - BFRL*). Verifica-se a utilização de medidas e métodos preditivos para quantificar o comportamento do fogo e meios para reduzir o impacto do fogo nas pessoas, na propriedade e no meio ambiente.

O laboratório além de ser um grande aliado dos bombeiros norte-americanos, também promove cursos e desenvolve sofisticados estudos analíticos, usando ferramentas computacionais para prever o comportamento dos materiais, em especial para concreto de alta resistência – CAD, seus resultados são confrontados com os ensaios laboratoriais que são quase sempre em escalas reais.

Ensaio dentro de um compartimento à prova de fogo, pesquisadores do NIST submeteram réplicas em larga escala de andares de edifícios comerciais a incêndios produzidos por três queimadores movidos a gás.

³ *Institute of Building Materials Concrete Construction and Fire Protection – IBMB*. Dinamarca. Disponível em: <https://www.tu-braunschweig.de/en/ibmb>. Acesso 27 maio 2022

⁴ *National Institute of Standards and Technology – NIST*. EUA. Disponível em: <https://www.nist.gov/> Acesso em 27 maio 2022

1.2.5 *Norwegian Fire Research Laboratory – SINTEF NBL*⁵

Este laboratório Norueguês pesquisa comportamento de sistemas construtivos e seus respectivos materiais sob o fogo, a resistência de elementos estruturais, a detecção e a movimentação de fumaça, a supressão do fogo, e outros. Também avalia sistemas de combate a incêndio, o desenvolvimento do fogo, o risco de incêndio durante a construção, proteção contra o lascamento do concreto e o sistema de ventilação de túneis.

1.2.6 *National Research Council of Canada – NRCC*⁶

Localizado em Ottawa, no Canadá, o diferencial desta instituição é um forno de teste para pilar como sendo um dos maiores fornos de coluna do mundo e o único na América do Norte capaz de testar a resistência ao fogo de um pilar carregado em larga escala (com cargas verticais e laterais). A carga lateral permite a simulação das condições de terremoto após ou antes dos incêndios. Também é constituído por um programa de pesquisa sobre fogo onde analisa o comportamento de sistemas construtivos e seus respectivos materiais (Figura 8), a detecção e a movimentação de fumaça, a supressão do fogo, e outros. Desenvolve modelos matemáticos para prever a resistência dos materiais ao fogo.

Diferenciais da instituição e Ensaios:

- a) caracterização do desempenho do fogo de materiais, sistemas estruturais e produtos, pesquisa resistente ao fogo;
- b) desenvolvimento de tecnologia, aprimoramento e testes de sistemas de proteção contra incêndio;
- c) gerenciamento de fumaça, detecção de incêndio e sistemas de supressão de fogo;
- d) testes padrão de acordo com a maioria dos padrões internacionais de teste de fogo;

⁵ *Norwegian Fire Research Laboratory - SINTEF NBL*. Noruega. Disponível em: www.sintef.no. Acesso em 27 maio 2022

⁶ *National Research Council of Canada – NRCC*. Canada. Disponível em: nrc.canada.ca/. Acesso 28 maio 2022

- e) modelagem de incêndio e avaliação de risco de incêndio;
- f) avaliação do comportamento humano em emergências de incêndio.

Figura 8 – A equipe de laboratório resfriando um conjunto de parede em chamas no forno de parede de 3,0m x 3,6 metros, após a conclusão de um teste de fogo.



Fonte: National Research Council Canada (2019)

1.2.7 Rise Research Institutes of Sweden – RRIS ⁷

Este instituto Sueco possui um moderno laboratório de tecnologia do fogo, onde são avaliados componentes construtivos, as construções, elementos estruturais (lajes, vigas e pilares), túneis, fachadas e outros materiais submetidos ao fogo. Desenvolve pesquisas com o objetivo de criar uma metodologia para determinar o lascamento do concreto, de fazer um estudo de dosagem de concreto auto-adensável, de determinar o efeito de vários fatores na ocorrência do lascamento, de avaliar a resistência de concreto auto-adensável com fibras de polipropileno ao lascamento explosivo e de desenvolver um guia de como produzir um concreto auto-adensável resistente ao lascamento para diferentes aplicações.

⁷ Rise Research Institutes of Sweden – RRIS. Suíça. Disponível em: <https://www.ri.se/en/what-we-do/services/fire-resistance-testing>. Acesso 27 maio 2022

Diferentemente do cenário externo, tem-se pouco investimento no setor de incêndio no Brasil. Verifica-se apenas dois grandes laboratórios capazes de realizar ensaios em larga escala. Os laboratórios se encontram predominantemente na região sul e sudeste do País, onde se descreve sobre ele nos tópicos seguintes.

1.2.8 Laboratório de Segurança ao Fogo (LSF) do IPT⁸

É o pioneiro, tradicional e muito reconhecido Laboratório de Incêndio do país tendo iniciado suas atividades em 1979, o laboratório realiza testes e ensaios laboratoriais em reação e resistência ao fogo dos materiais empregados nos edifícios. Certifica e realiza ensaios para os sistemas e equipamentos de detecção e alarme; na iluminação, na sinalização e comunicação de emergência; e de combate a incêndio.

Diferenciais e soluções:

- a) reação ao fogo dos materiais;
- b) resistência ao fogo;
- c) saídas de emergência;
- d) extinção de incêndio;
- e) detecção e Alarme de incêndio;
- f) avaliação dos projetos de proteção contra incêndios em edificações;
- g) segurança contra explosões em processos industriais, armazenamento e transporte;
- h) análise de causas e evolução de incêndios e explosões.

A instituição também dispõe de serviço de inspeção e avaliação do grau de comprometimento de edificações incendiadas.

1.2.9 Laboratório de Segurança Contra Incêndio (LSCI) da Unisinos⁹

Assim como o IPT, porém bem mais recente, a instituição também promove o

⁸ Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. São Paulo. Disponível em: http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CETAC/laboratorios_e_sessoes/36-laboratorio_de_seguranca_ao_fogo_e_a_explosoes___lsfex.htm. Acesso em 27 maio 2022

⁹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS - Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil – ITT. São Paulo. Disponível em: <https://www.unisinos.br/itt/performance/infraestrutura>. Acesso em 27 maio 2022

serviço de inspeção e avaliação do grau de comprometimento de edificações incendiadas, realização de ensaios e criação de projetos de reforços e de recuperação, tendo iniciado suas atividades em 2011, e mais abrangentemente em 2013, após o incêndio na Boate Kiss. Divide-se na área de pesquisa e ensaios laboratoriais de Reação e Resistência ao fogo.

É afiliada por instituições, tais como, a Associação de Proteção Passiva contra Incêndios - ABPP e Associação Luso-Brasileira para a Segurança Contra Incêndio - ALBRASCI.

Laboratório de Reação ao Fogo, possibilita determinar as características de reação ao fogo de produtos e sistemas construtivos de acordo com a capacidade dos materiais de entrar em combustão, propagar chamas e produzir fumaça. O Laboratório de Resistência ao fogo, conta com um forno vertical, construído conforme as normas ISO 834 e ABNT NBR 10636, e que apresenta taxa de acréscimo de temperatura de acordo com a curva padrão de incêndio. O isolamento térmico, a estanqueidade e a estabilidade de sistemas construtivos são analisados e testes são realizados em alvenarias, painéis de pré-fabricação, sistemas leves, sistemas inovadores, portas corta-fogo, testes de componentes, entre outros.

1.3 Pesquisadores:

No cenário brasileiro, observa-se que há um considerável avanço no sentido da qualidade e quantidade publicações relacionadas a ação do fogo nas estruturas de concreto. Embora os estudos sejam mais voltados de maneira geral para edificações, observa-se que também há consideráveis avanços relacionados ao tema quanto inserido no cenário das Pontes e Viadutos, mesmo sendo um assunto ainda de maior especificidade. Publicações de livros importantes com o tema do fogo foram desempenhados por engenheiros, professores e consultores como: Valdir Pignatta e Silva (2012), João Paulo Correia (2021), Rafael Luiz Galvão (2021), Paulo Roberto do Lago Helene (2019), Bernardo Fonseca Tutikian e Fabrício Bollina (2019). No campo das publicações de dissertações, teses e artigos científicos verifica-se que os principais laboratórios e centros de pesquisas nacionais, o IPT e o ITT PERFORMANCE ainda fomentam e geram as principais literaturas sobre o tema. Nesse sentido, autores como Antonio Fernando Berto (1991 e 2020), André Luiz Scabbia (2020) e Carlos Amado Brites (2019) contribuem significativamente para a

literatura das estruturas acometidas pelo incêndio. No cenário internacional observa-se que um dos principais pesquisadores ocidentais sobre o tema, e principal referência, é o Professor Venkatesh R. Kodur (2005) da Universidade Estadual de Michigan. Nesse momento, Kodur, além de possuir vasto conteúdo publicado em relação a testes, ensaios e análises sobre o comportamento e interação do fogo com as estruturas, o autor também já desenvolve pesquisas relacionadas a classificação do risco de incêndio em pontes através de “machine learning”, tema bem ajustado com o avanço tecnológico na época qual vivemos.

1.4 Conteúdo desta Dissertação

Na seção 1 destaca-se a importância do estudo de incêndio nas estruturas como tema principal, mediante um breve histórico com o subsídio de acontecimentos mundialmente conhecidos e também de eventos mais atuais de relevância para a nossa sociedade. Também é evidenciada a cultura reativa e o desenvolvimento de legislações em convergência a estes acontecimentos. Inclui-se também nesta seção a apresentação de maneira sintetizada de quais são os principais pesquisadores e centros de pesquisa sobre o tema no Brasil e no mundo.

Na seção 2, são apresentados os conceitos básicos de entendimento dos mecanismos de interação do fogo com o meio, conceitos relativos à proteção passiva e ativa, ensaios aplicáveis para avaliação de materiais quanto a sua contribuição para o incêndio, materiais triviais utilizados para a proteção ao fogo na atualidade e um conciso entendimento sobre a análise de risco.

Na seção 3, apresenta-se o comportamento e os efeitos do fogo sobre o concreto e a pasta hidratada do cimento e também sobre os agregados e as armaduras de aço, tanto na sua característica ou estado passivo, quanto em situação ativa em um elemento estrutural sob o efeito do fogo.

Na seção 4, é feita uma abordagem elementar sobre o que é discutido no meio técnico no tema de Pontes como ferramentas fundamentais para o desenvolvimento da humanidade, sua origem, tipos e a classificação dos seus elementos.

Na seção 5, apresenta-se tópicos relativos as inspeções de acordo com a norma brasileira de inspeções de Pontes - ABNT NBR 9452:2019, o conceito sobre o gerenciamento de pontes, bibliografia dos riscos existentes no cenário internacional e nacional, bem como ensaios aplicáveis para avaliação da condição residual de uma

Ponte. Descreve-se também nesta seção, o atual cenário do Município de São Paulo mediante a ocupação por parte da população em situação de rua, a evolução do desprendimento financeiro e o caso real do Incêndio no Viaduto Santo Amaro em 2016 e na Ponte do Jaguaré em 2019.

Por fim, na seção 6 apresentam-se as conclusões desta dissertação, com a descrição das transferências de conhecimentos disponibilizadas, bem como uma matriz de decisão relacionada a proteção dessas estruturas ao incêndio. Também, sugerem-se assuntos para futuras pesquisas

CONCEITOS BÁSICOS DO FOGO

Segundo Garlock *et al* (2012), o fogo é um dos mais severos perigos que pode acometer as estruturas já construídas durante sua vida útil.

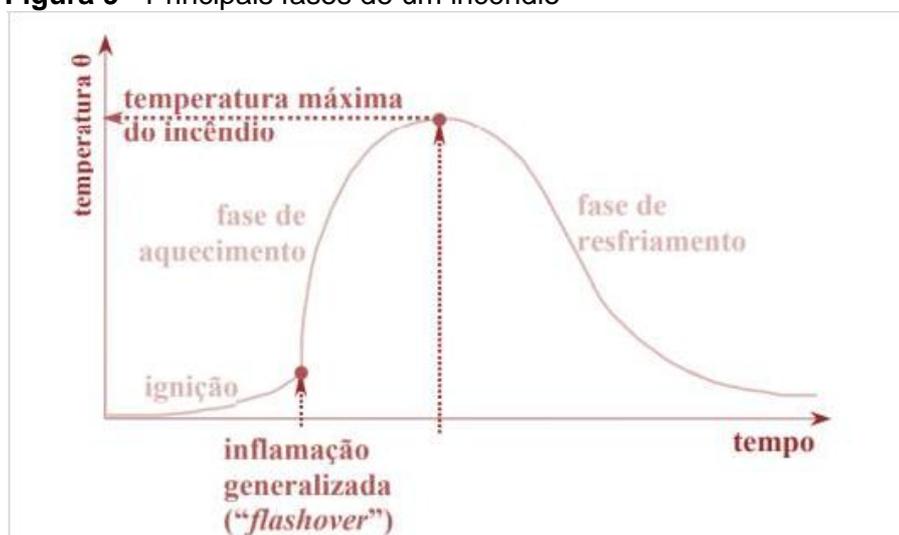
Segundo Rodrigues e Oliveira (2021) o fogo é um fenômeno físico-químico que tem como resultado a combustão, sendo um processo que se dá em decorrência da reação química entre o combustível e comburente. É caracterizado por ser uma reação exotérmica que resulta na liberação de energia na forma de calor que além da forma de calor liberada, tem-se também para combustíveis orgânicos a liberação de dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O). Para a ocorrência da combustão há necessidade do fornecimento de energia de ativação na reação, que é conhecida como a fase de inicial ou de ignição.

A definição dada pela ABNT NBR 13860:1997 é de que “O fogo é o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz”. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Dessa forma, dada a ignição, que segundo Helene, Brites e Carvalho (2019) é o estágio de aquecimento no início do incêndio ou também pré flashover, são possíveis de ocorrerem reações em cadeia. Dessa forma, a própria energia gerada dará continuidade muito rapidamente a outros processos de combustão diante a presença de material combustível.

Segundo Helene, Brites e Carvalho (2019) os estágios principais de um incêndio são: ignição, *flashover* e resfriamento, conforme (Figura 9):

Figura 9 - Principais fases de um incêndio

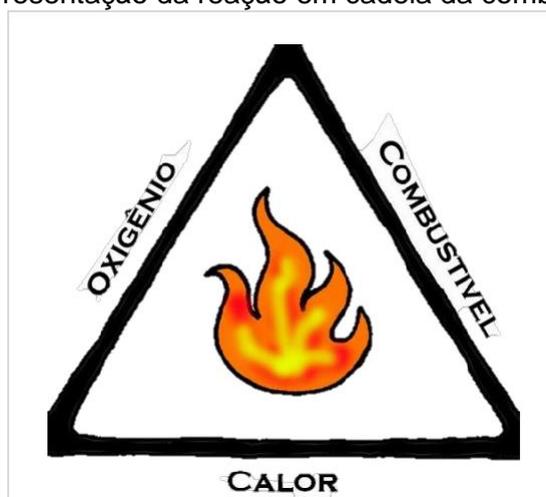


Fonte: Adaptado de Helene, Brites e Carvalho (2019)

Verifica-se, portanto, que a fase inicial de um incêndio se dá na ignição, onde há o aquecimento até que se alcance a temperatura máxima, seguida do resfriamento em função do tempo decorrido.

Segundo Seito *et al* (2008), a interação do fogo só se manterá enquanto existir a matéria combustível e o comburente, representada pelo princípio da reação em cadeia usualmente representada pelo triângulo do fogo (Figura 10).

Figura 10 - Representação da reação em cadeia da combustão.



Fonte: Elaborado pelo autor

Sabe-se então que enquanto existirem comburente e combustível a reação em cadeia tenderá a perpetuar-se. Portanto, verifica-se que dentre as principais finalidades dadas para as ações de combate ao incêndio, duas estratégias são fundamentais: extinguir o comburente ou controlá-lo, evitando assim o crescimento do fogo e danos.

2.1 Mecanismos de transferência de calor

Segundo Lin (2020), o conceito de transferência de calor é amplamente difundido, e que a ação do fogo pode se manifestar através de três mecanismos básicos de transferência de calor: radiação, condução e convecção.

A radiação térmica, ou simplesmente radiação, consiste na transferência de calor através do calor radiante transmitido através das ondas eletromagnéticas. Diante a sua propagação, tem-se a característica de não ser visível aos olhos, mas sensível a pele humana e outros materiais que são capazes de absorver sua propagação

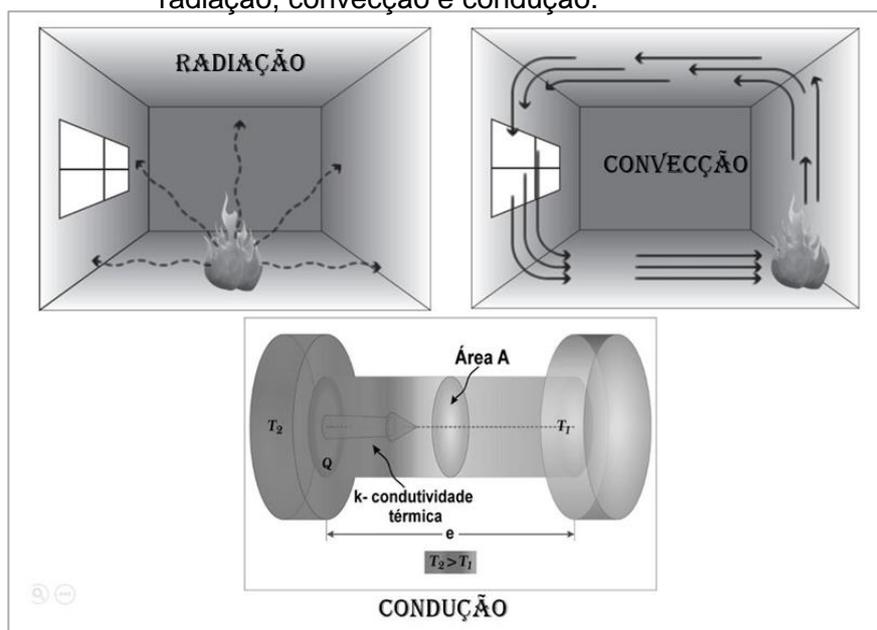
através do vácuo ou de gases.

A condução térmica, também conhecida como difusão térmica, é o mecanismo que envolve a transferência de calor no meio ou corpo sólido, obedecendo o segundo princípio da termodinâmica onde o calor é conduzido da maior para menor temperatura em um único objeto ou em contato com outros objetos.

A convecção é o meio de transferência de calor que se desenvolve no meio líquido e no meio gasoso. Nota-se que durante o desenvolvimento deste fenômeno há o aumento do volume destes elementos acarretando numa baixa de densidade, com isso o fluxo de gases mais quentes tende a subir gerando uma atmosfera convectiva muito observada durante a ocorrência de grandes incêndios.

Segundo Lin (2020), durante uma situação de incêndio em uma edificação, observam-se a ocorrência de todos os mecanismos de propagação do fogo (Figura 11).

Figura 11 - Representação dos mecanismos de transferência de calor: radiação, convecção e condução.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Silva (2016)

Representa-se os possíveis mecanismos de transferência de calor em um cenário de incêndio em uma edificação com dois recintos diferentes, segregados por uma parede divisória na figura 10. A ignição por condução, sendo causado pela temperatura utilizando-se da parede como meio de propagação, a radiação através do distanciamento seguro insuficiente, bem como o surgimento de gases de convecção que se formam buscando a partes mais altas.

2.2 Reação e Resistência ao fogo

Pode-se afirmar que a reação ao fogo está atrelada as características dos materiais quanto frente a ação do fogo, já a resistência ao fogo está atrelada a capacidade de um suportar a ação do fogo, preservando a sua funcionalidade, suportando a interação dada a partir do momento que entram em contato. De maneira aprofundada e referenciada são descritos nos tópicos seguintes os principais parâmetros quantos a essas duas características.

2.2.1 Reação ao fogo

Os materiais das estruturas, acabamento e aqueles presentes posteriormente ao seu uso e ocupação são os grandes protagonistas de um incêndio. Dessa forma, pode-se afirmar que os riscos e comportamento da estrutura estão diretamente ligadas a reação desses materiais quando submetidos ao calor e ao fogo. As formas como esses materiais contribuem para o incêndio segundo Berto (2020), são:

- a) sofrendo e sustentando a ignição;
- b) desenvolvendo calor;
- c) propagando chamas;
- d) desprendendo partículas em chamas;
- e) desenvolvendo fumaça.

Portando a evolução do incêndio está diretamente ligada à contribuição dos materiais em função de suas características de reação ao fogo. Segundo Berto (2020), essas características podem ser avaliadas em laboratório, mediante condições padronizadas de ensaio, onde são fixados alguns parâmetros, tais como:

- a) temperatura do ambiente;
- b) radiação incidente sobre o material;
- c) existência ou não de chama-piloto;
- d) dimensões do material;
- e) condicionamento prévio do material.

Os principais métodos de ensaios para caracterização dos materiais quanto a reação ao fogo pode ser feita de maneira específica, ou usualmente enquadradas nos

ensaios dispostos na *Fire tests – Building materials “Non combustibility testes”, Reaction to fire tests - Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame - Part 1: Guidance on ignitability*, Ensaio de reação ao fogo em pisos — Determinação do comportamento com relação à queima utilizando uma fonte radiante de calor.

No ensaio de incombustibilidade, com base na norma na ISO 1182:2020 – *Fire tests - Building materials – “Non combustibility testes”*. Verifica-se a capacidade dos materiais de sofrerem ignição e como contribuem para o desenvolvimento do incêndio (Figura 12).

Figura 12 - Realização de ensaio de Reação ao fogo dos materiais no laboratório de incêndio e explosões do IPT.

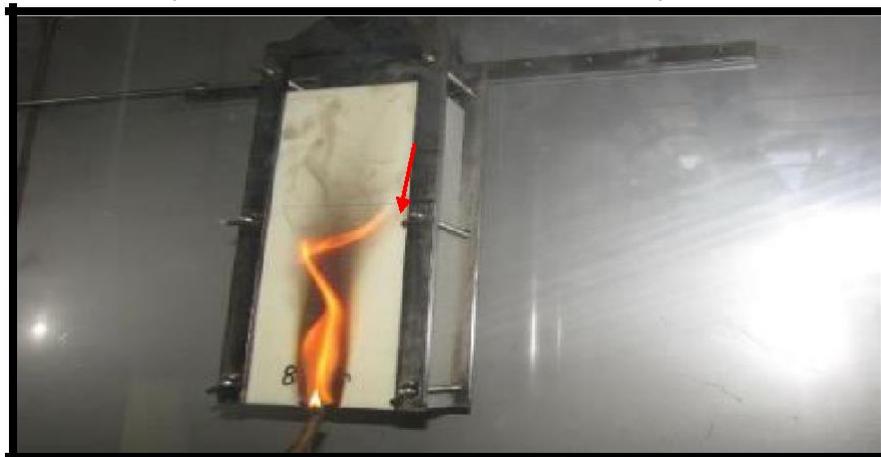


Fonte: Berto (2020).

Observa-se durante a realização do ensaio a capacidade do material ensaiado de produzir chamas, característicos dos materiais combustíveis.

No ensaio de ignitabilidade, com base na ISO 11925-2 :2020 - *Reaction to fire tests -- Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame - Part 1: Guidance on ignitability*, são verificadas a propagação da chama dos materiais, levando-se em conta o tempo em que a frente da chama leva para atingir a marca de 150 mm, medida a partir da extremidade inferior do corpo-de-prova (Figura 13). No desenvolvimento deste ensaio, são realizados dois tipos de aplicação de chama: sendo uma de superfície e outra chama na borda.

Figura 13 - Realização de ensaio de ignitabilidade em superfície do corpo de prova no laboratório de incêndio e explosões do IPT.



Fonte: Berto (2020).

Observa-se na imagem a realização do ensaio de ignitabilidade com a aplicação da chama na borda, é possível também verificar a propagação da chama em direção a linha de referência que é marcada previamente a realização do ensaio.

No ensaio de propagação superficial de chamas feita através da norma ABNT NBR 8660:2013 – “Ensaio de reação ao fogo em pisos — Determinação do comportamento com relação à queima utilizando uma fonte radiante de calor”, verifica-se o menor nível de fluxo de energia térmica capaz de manter a propagação da chama na superfície do material, corpos-de-prova (230mm x 1050mm) são ensaiados em posição horizontal e expostos a um fluxo de energia térmica decrescente ao longo do comprimento mediante uma chama piloto aplicada na borda onde incide o maior nível de radiação (Figura 14).

Figura 14 - Preparo do ensaio de determinação do comportamento com relação à queima utilizando uma fonte radiante de calor, IPT.



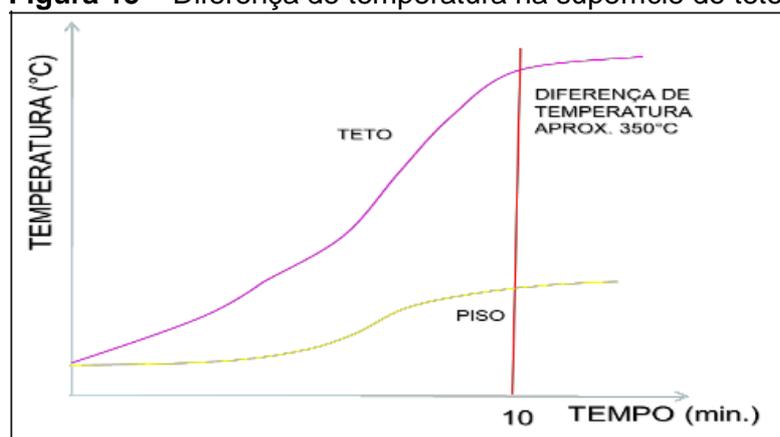
Fonte: Berto (2020).

Mediante a realização ensaio de propagação superficial de chamas, verifica-se a resistência à chama, desenvolvimento de calor, e desenvolvimento de fumaça no material ensaiado. Em posse do conhecimento das características dos materiais que compõe a estrutura, ou daqueles que estão dispostos em sua fase de uso, no sentido da visão de segurança contra incêndio, procura-se entender os tipos de materiais nos cenários de contorno com o intuito de dificultar a ocorrência de inflamação generalizada, dentre outras perdas. Outrora, a ocorrência de inflamação generalizada também pode estar atrelada a diversos outros fatores, onde segundo Berto (2020), podem ser:

- a) distância existente entre o piso ao teto;
- b) inércia térmica da envoltória do ambiente;
- c) potencial térmico total.

A posição relativa do elemento também é um importante fator a ser levado em consideração, entende-se por isso que a temperatura contida em um recinto tende a ser maior na sua parte superior que na parte inferior, como disposto no gráfico da Figura 15, podendo ser o principal motivo de se encontrar maiores danos referente as faces inferiores das lajes de Pontes e Viadutos.

Figura 15 – Diferença de temperatura na superfície do teto x piso.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Berto (2020).

Na fase inicial, a reação dos materiais pode gerar calor suficiente para acelerar as moléculas de sua composição, liberando gases que concentrados podem dar continuidade à ignição e inflamar outros componentes. Portanto, na fase inicial do incêndio, a reação dos elementos ao fogo pode contribuir ou não à sua propagação; caso o incêndio não possa ser contido, o comportamento de resistência ao fogo dos

materiais e sistemas tornam-se de suma importância.

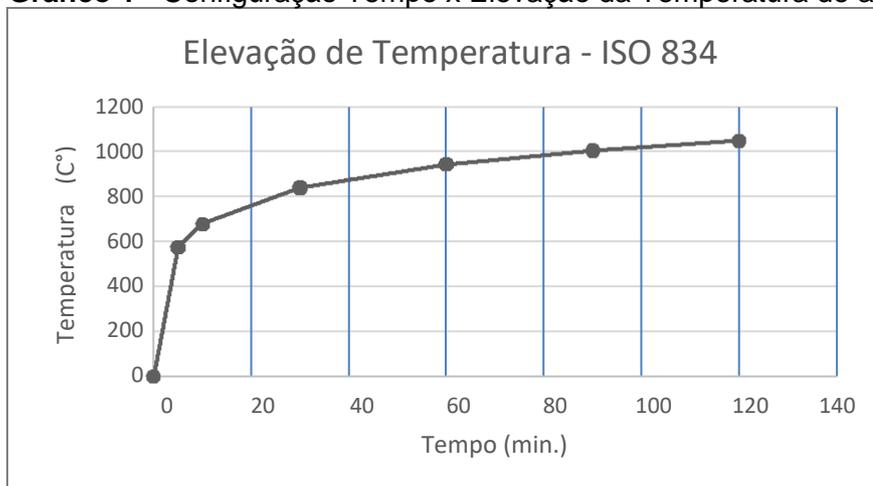
Sob essas condições, entram em cena a compartimentação horizontal e vertical, com o objetivo de evitar uma possível expansão, seja do calor, chamas ou gases tóxicos (fumaça), e conseqüentemente a inflamação generalizada. É dessa forma, classifica-se um material quanto resposta as altas temperaturas, bem como os riscos pré-existentes contidos em uma edificação quanto ao fenômeno do fogo.

2.3 Curvas-padrão de temperatura e fases do Incêndio

As Curvas-padrão de Simulação de Incêndio fazem parte do cenário onde se realizam os ensaios estruturais, e são utilizadas para aplicações experimentais de laboratórios com o intuito de padronizar os testes e fornecer referências de análise para comparar comportamentos de elementos estruturais sob uma condição pré-fixada do aumento de temperatura em função do tempo. Utiliza-se tanto como critério para materiais construtivos quanto ao seu desempenho mínimo frente a ação de um incêndio. Nesse sentido, criou-se conceito de Tempo Requerido de Resistência - TRRF ao Fogo ou TRRF.

Observam-se diferentes tipos de curvas de incêndio padrão utilizadas no Brasil, sendo a mais difundida no meio técnico Brasileiro a curva-padrão ISO 834:1975 (Gráfico 1), muito aplicada na área de incêndio em edificações, a qual é utilizada, entre outras propriedades, para verificar a resistência e comportamento ao fogo de elementos construtivos.

Gráfico 1 - Configuração Tempo x Elevação da Temperatura de acordo com a ISO 834.



Fonte: Elaborado pelo autor com base na ISO 834

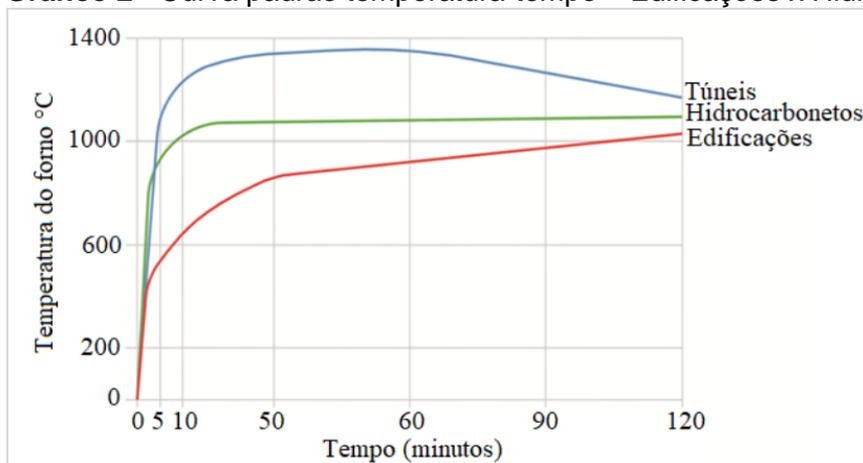
De maneira geral, o período das curvas é sempre expressado e medido em intervalos a cada 30 minutos.

A curva real de incêndio depende das muitas características específicas do local a ser analisado, portanto as normas técnicas uniformizam a exposição e recomendam que seja empregada a curva modelo incêndio-padrão ISO 834. (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1975)

É fundamental elencar também, outros tipos de curvas para o cenário de incêndio, uma vez que se entende que podem existir diferentes tipos de situações, onde há incêndios mais específicos a acontecerem por exemplo em locais distintos ou através de materiais combustíveis específicos.

Segundo Woodworth *et al* (2015) dados estatísticos sobre a ocorrência de incêndios em pontes nos EUA destacam que a taxa de incêndios por hidrocarbonetos que ameaçam pontes é de aproximadamente um por ano com base em dados de 1994 a 2013. Nesse sentido, para essas estruturas verifica-se uma maior possibilidade de uma conflagração a partir da origem de materiais derivados do petróleo, sendo mais adequada e estratégica para uma avaliação, a utilização da curva de incêndio padrão de hidrocarbonetos (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Curva padrão temperatura-tempo – Edificações x Hidrocarbonetos x Túneis



Fonte: Britez (2019)

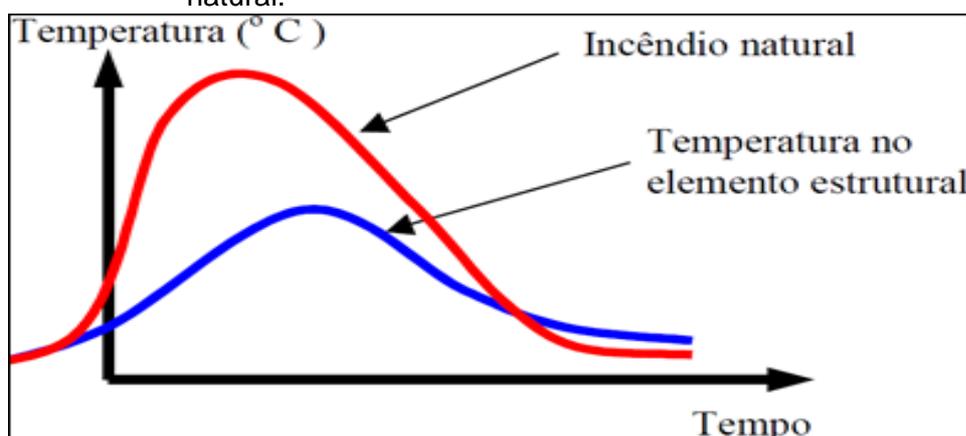
Segundo Britez (2019) as curvas de incêndio padrão de túneis, hidrocarbonetos e edificações são as mais utilizadas no Brasil para estudos experimentais, embora ainda existam outras ainda mais específicas para cada situação.

SILVA (2016) afirma que o tempo de resistência dos elementos é determinado

por estas curva-padrão de aquecimento, chamado de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo — TRRF. Segundo a norma ABNT NBR 14432:2001 o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo - TRRF é definido como sendo “o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão”. Nesse sentido a resistência ao fogo é estabelecida em função da resistência dos elementos construtivos isolados em resistir à ação do fogo por um determinado período de tempo. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

Para a determinação da resistência de um elemento estrutural em situação de incêndio, é necessário conhecer o comportamento do material durante o incêndio e no projeto utiliza-se um modelo fictício, o modelo do incêndio-padrão (Figura 16).

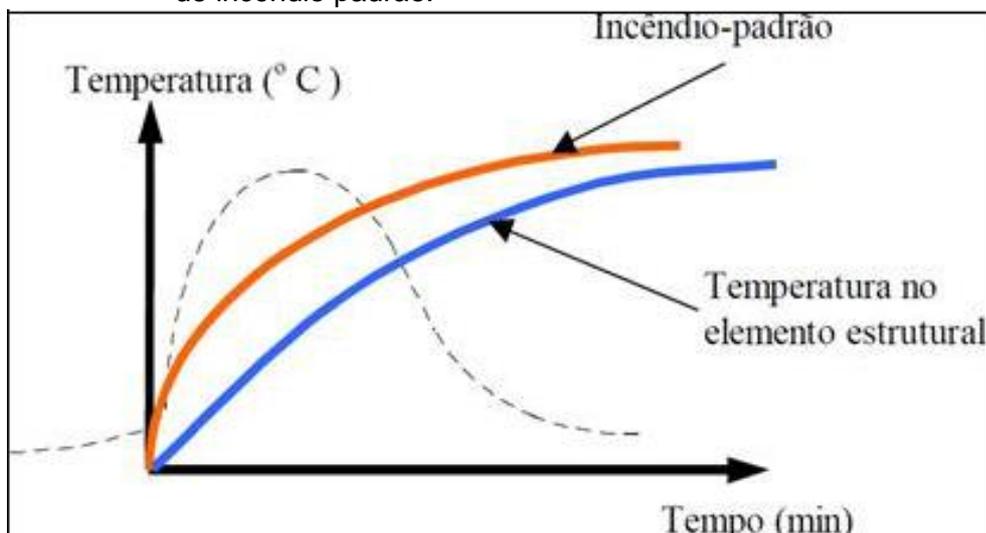
Figura 16 - Curva da temperatura no elemento estrutural com base no incêndio natural.



Fonte: Adaptado pelo autor com base nos dados de Lin (2020)

Deve-se ressaltar que o TRRF é um parâmetro de projeto e não se deve representá-lo como o tempo de duração do incêndio, temperatura dos elementos acometidos, tempo seguro para desocupação ou tempo-resposta do corpo de bombeiros (Figura 17).

Figura 17 - Curva da temperatura no elemento estrutural com base na curva de incêndio padrão.



Fonte: Adaptado pelo autor com base nos dados de Lin (2020)

Por meio das curvas supracitadas, determina-se a máxima temperatura atingida no incêndio e a respectiva capacidade resistente dos elementos estruturais, bem como, para o concreto, avalia-se a ocorrência ou não dos efeitos de deslocamentos explosivos (“spalling”) comuns e destrutivos nas estruturas que são acometidas pelo incêndio.

As temperaturas de um incêndio estão diretamente relacionadas as suas fases. Portanto, os incêndios possuem temperaturas que podem ser representadas por curvas com três etapas bem definidas: a fase inicial ou de ignição, fase de aquecimento ou crescimento e fase de resfriamento (Figura 18).

Figura 18 - Fases de um incêndio.



Fonte: Adaptado pelo autor com base nos dados de Lin (2020)

As fases de um incêndio, devem levar em consideração também que caso haja ações de combate previamente a seu crescimento a curva se comportará de forma mais branda, na qual está representada na cor roxa. Outros fatores que podem influenciar nesse comportamento são as quantidades presentes de combustíveis e de comburente.

Segundo Silva (2016) a carga de incêndio é a soma dos potenciais caloríficos dos materiais ali disponíveis dados em mega joules (MJ), sendo a temperatura do incêndio diretamente relacionada à carga de incêndio (Quadro 1).

Quadro 1 – Potenciais caloríficos dos materiais do Eurocode.

TIPO DE MATERIAL	POTENCIAL CALORÍFICO ESPECÍFICO (MJ/KG)
MADEIRA	17,5
PAPEL	20
PLÁSTICO (ABS)	40
PALHA	20
ROUPAS	20

Fonte: Silva (2016)

Também, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001), ABNT NBR14432, a carga de incêndio é definida pela soma das energias caloríficas e a carga de incêndio específica é obtida através da divisão da carga disponível pela área a qual ela se encontra, em exemplo, uma sala de depósito com 10 m² possui 30 quilogramas de papel (20MJ/kg), dessa forma:

$$a) \quad 30\text{kg} \times 20\text{MJ/kg} = 600\text{MJ} / 10\text{m}^2 \text{ (sala)} = 60\text{MJ/m}^2.$$

Dessa forma, a sala supra exemplificada possui um potencial específico de incêndio com 60MJ/m², que é o valor estimado utilizado para calcular a duração e a intensidade de um incêndio em determinado local.

A presença do comburente durante o incêndio corresponde a troca de gases presentes promovendo correntes de convecção que geralmente resultam na renovação constante de gases presente em um ambiente. Geralmente quando ocorre a impossibilidade desta renovação do ar, o incêndio possui uma característica de ser de curta duração e também de alcançar menores temperaturas.

Nesse contexto, também é usualmente conhecido pelos bombeiros e previsto por este corpo técnico, alguns fenômenos que envolvem a diminuição da oferta de oxigênio (material comburente), sendo um dos mais conhecidos, o denominado “*backdraft*” (Figura 19).

Figura 19 - Representação do “*backdraft*” após interação intencional de oxigênio.



Fonte: Lin (2020)

Segundo WU et al. (2011), a condição de ventilação em um ambiente durante a situação de incêndio é o ponto chave para a haja a ocorrência de “*backdraft*”. Ainda não há dados que nos permite afirmar, mas verifica-se a possibilidade de ocorrência desse fenômeno em caixões perdidos, que é um modelo estrutural bastante conhecido para Ponte e Viadutos.

2.4 Proteção contra o fogo

Além da análise do comportamento de um elemento estrutural sob ação do incêndio, é de fundamental importância também entender a existência de duas medidas de proteção contra o fogo, sendo esta formadas por medidas de proteção ativa e passiva da estrutura.

2.4.1 Medidas de proteção passiva

Segundo Berto (1991), são aquelas quais estão incorporados ao sistema construtivo, sendo funcionais durante sua usual utilização e que devem reagir

passivamente ao desenvolvimento do fogo em caso de incêndio.

Segundo Rodrigues e Oliveira (2021) a compartimentação horizontal, vertical e a resistência ao fogo dos elementos estruturais são os departamentos mais relevantes para a segurança das estruturas sujeitas ao colapso devido a ação do fogo em estruturas.

Portanto esta medida tem capacidade de influenciar decisivamente na mensuração e limitações da estrutura afim de evitar o crescimento e propagação do fogo. Alguns exemplos de proteção passiva em edificações podem ser citados tais como:

- a) compartimentação horizontal e vertical;
- b) sinalização de emergência;
- c) controle dos materiais de acabamentos e revestimentos da edificação – CMAR;
- d) rotas de fuga;
- e) correto dimensionamento de elementos estruturais ou sua respectiva proteção.

2.4.2 Medidas de proteção ativa

Correspondem ao sistema que depende de mecanismos de acionamento, geralmente de terceiros ou automatizações, como detecção de fumaça, alarmes, iluminação de emergência e dos meios de combate como: hidrantes ou chuveiros automáticos. Portanto, são sistemas que entram em ação quando é dado o início ao incêndio. Segundo Berto (1991), esses sistemas estão diretamente vinculados as instalações complementares prediais associadas a edificação (Quadro 2).

Quadro 2 - Sistemas de proteção passiva

Medidas de Proteção	Sistemas
	continua
Ativa	Chuveiros
	Automáticos
	Extintores
	Detecção de incêndio
	Luzes de Emergência
	Extração de fumaça

Medidas de Proteção	Sistemas
	Conclusão
Passiva	Compartimentação
	Saídas de emergência
	Revestimento estrutural
	Controle de materiais de acabamento e revestimento
	Sinalização
Indefinido (inovações)	Cortinas automatizadas
	Portas Automatizadas
	Damper corta-fogo

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Berto (1991, p.6) e Lin (2020, p.12).

Segundo Lin (2020), no campo da inovação surgem sistemas ainda com indefinições quanto ao seu enquadramento protetivo. Contudo, os objetivos gerais das proteções ao fogo são de cumprir exigências que visam garantir a baixa probabilidade de início do incêndio, risco a vida e danos a propriedade acometida pelo fogo, bem como na vizinhança.

2.4.3 Alguns materiais e métodos de proteção ao fogo para estruturas

No campo da proteção das estruturas contra o fogo, verificam-se materiais de proteção estruturais ao fogo destinados a retardar e as consequência dos efeitos do aumento da temperatura nos sistemas estruturais. Para pontes e viadutos essa é uma prática que visa não só isso, mas também assegura outros impactos econômicos diretos, prevenindo a:

1. Reconstrução de parte das estruturas ou sistemas completos
2. Desvio do tráfego, tornando as viagens inconvenientes para os residentes locais, viajantes e camionistas.

Relacionado a proteção contra fogo seu campo engloba tanto as construções novas quanto as antigas, nesse segundo caso ocorrem de maneira mais comum quando há necessidade de adequação visando ocorridos do passado ou atendimento da legislação vigente em função da não atualização ou até mesmo mudança na tipologia de uso da estrutura. Dessa forma, essa implementação é usualmente

conhecida como “*retrofit*” e faz-se necessárias inclusões de novas exigências quanto a segurança contra incêndio KHOURY (2002).

De modo geral, essa é uma realidade bastante difundida nos grandes centros urbanos, como exemplo o estado de São Paulo, onde a oferta por terrenos é escassa e as estruturas existentes tendem a alterar o uso ou outras disposições arquitetônicas iniciais de projeto.

Segundo Rodrigues e Oliveira (2021) as propriedades mais comuns e que devem ser avaliadas nos materiais constituintes de uma estrutura frente a ação do fogo, são:

- a) baixa densidade;
- b) condutividade térmica reduzida;
- c) calor específico;
- d) estabilidade química e mecânica sob ação do fogo;
- e) viabilidade econômica do material.

Logo, esses fatores podem influenciar diretamente na escolha de determinado produto ou sistema dentre diferentes tipos de proteções estruturais ao fogo. Os mais comuns sistemas adotados para a proteção de elementos estruturais contra a ação do fogo, são as:

- a) argamassas projetadas;
- b) fibras projetadas;
- c) placas pré-fabricadas ou Mantas anti-chama;
- d) pinturas intumescentes;
- e) Encamisamento de sacrifício.

As argamassas projetadas são convencionalmente compostas por gesso, vermiculita, cimento, resinas acrílicas ou celulose. Na sua execução, agregados finos e elementos ligantes são misturados com água e projetados diretamente sobre a estrutura com auxílio de pistola com ar pressurizado resultando em uma superfície rugosa que protege a estrutura (Figura 20).

Figura 20 - Estrutura protegida por argamassa projetada.



Fonte: Acervo pessoal

As fibras projetadas são formadas por agregados, fibras minerais e ligantes que são misturadas com água atomizada e jateados sobre superfície dos elementos construtivos, formando um revestimento rugoso sobre a estrutura.

Possui ainda um aspecto estético que limita a sua utilização basicamente em garagens, forros e outros ambientes com baixa exigência estética (Figura 21).

Figura 21- Estrutura com proteção em fibra projetada.



Fonte: Acervo pessoal

Placas pré-fabricadas podem ser fabricadas em gesso, silicato de cálcio, materiais fibrosos ou em uma combinação desses materiais. As placas são estruturadas com o auxílio de pinos ou perfis de aço (Figura 22).

Figura 22 - Estrutura revestida por placas em silicato de cálcio.



Fonte: Acervo pessoal

Devido a características de baixa condutividade térmica das placas em silicato de cálcio, seu revestimento na estrutura resulta num retardo das temperaturas obtidas no elemento estrutural quando acometido pelo fogo. Outra proteção existente, semelhante as metodologias de implantação de placas de silicato, no mercado, mas ainda pouco difundida no brasil é o sistema de mantas anti-chama (Figura 23), com maior facilidade de instalação ela previne de maneira simples um possível dano a ponte, viaduto e suas instalações.

Figura 23 - Danos causados pelo fogo humano a utilidades sensíveis sob pontes e detalhe após a instalação da manta de incêndio no local após evento.



Fonte: Acervo pessoal

As mantas específicas contra incêndios são uma excelente forma de proteger Pontes e Viadutos de maneira geral. A tecnologia também inclui a proteção de cabos eléctricos, linhas de transmissão, e gasodutos, contra os danos causados por incêndios. Estas mantas de alta tecnologia resistem à exposição a chamas catastróficas até 1.600 graus Celsius.

As pinturas intumescentes possuem a propriedade de reagir quando em contato com o fogo. A partir da temperatura aproximada de 200 graus celsius, o sistema de pintura forma uma espuma expansiva, porosa e rígida na superfície do elemento revestido (Figura 24).

Figura 24 - Comportamento ao fogo em uma estrutura protegida por pintura intumescente, aspecto antes, durante e depois da ação do fogo.



Fonte: Acervo pessoal

Sua alta porosidade e baixa condutividade térmica retardam o avanço da temperatura sobre as estruturas. As pinturas intumescentes podem ser aplicadas através de pincel ou sistema “*airless*” dando ao produto acabado um aspecto semelhante a uma pintura convencional, geralmente estão relacionadas a proteção contra o fogo em estruturas mistas de concreto e aço, Silva (2012).

Os “encamisamentos” de sacrifício podem ser interpretados como algumas práticas específicas observadas no território brasileiro onde, pontualmente se faz o aumento da secção transversal do elemento estrutural da Ponte ou do Viaduto. Verifica-se que esse tipo de técnica é feito principalmente em viadutos que estão abrigados permanentemente por população em situação de rua (Figura 25).

Figura 25 – Alargamento de pilares vulneráveis a ação de moradores em situação de rua no complexo Lagoinha em Belo Horizonte - MG.



Fonte: Acervo pessoal

Observa-se que essa é uma prática usual na região metropolitana de Belo Horizonte e visa criar uma camada de sacrifício, por maior em concreto, sem função estrutural ou acréscimo de carga à estrutura, evitando assim que as chamas possam atingir diretamente os elementos estruturais das Pontes ou Viadutos.

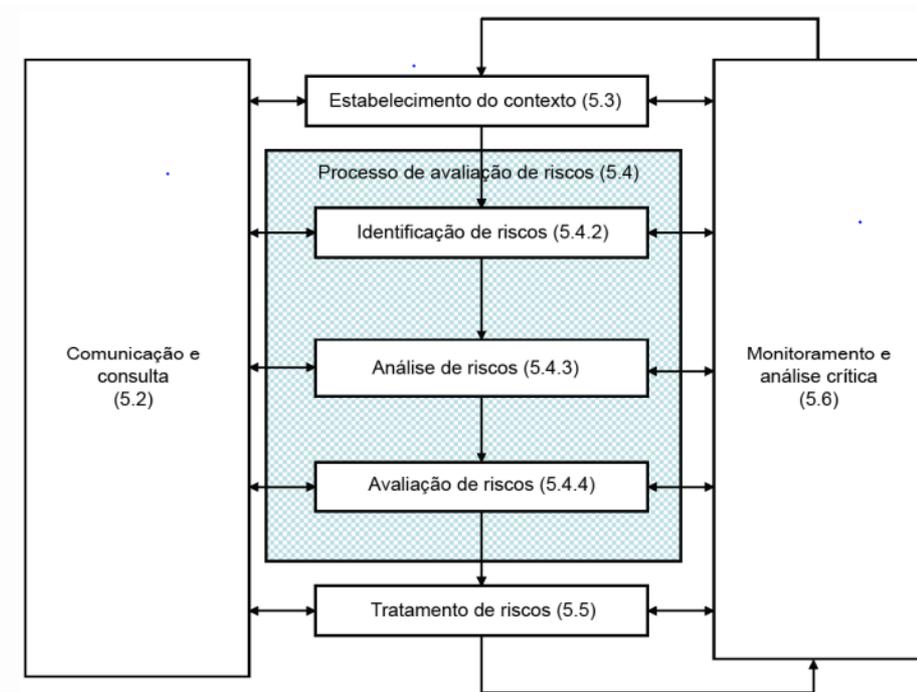
2.5 Análise de risco em um cenário de incêndio estrutural

Segundo Scabbia (2020) a realização de uma análise de risco para estruturas submetidas ou sujeitas a ação do fogo é de fundamental importância, mesmo sendo durante a fase concepção inicial ou durante fase de uso da estrutura. Os principais aspectos da análise são representados através de estudos que envolvem verificar:

- a) Quais serão as atividades desempenhadas no local?
- b) Quais são os aspectos da ocupação?
- c) Quais são as características dos materiais quanto a resistência e reação ao fogo?
- d) Quais são os mecanismos de detecção prévia, extinção e quando preciso, de fuga das pessoas?

Na Figura 26 em seguida é ilustrado um modelo generalizado relativo a análise de riscos para situações de incêndio.

Figura 26 - Fluxograma sugerido para desenvolvimento de análise de riscos.



Fonte: ABNT NBR 31000 (2009) - Gestão de riscos — Princípios e diretrizes

Verifica-se através do modelo de fluxo supramencionado (figura 26), que, somente a partir da correta caracterização do objeto de estudo tem-se uma assertiva análise de risco. Sendo fator primordial nas etapas seguintes quanto a identificação e estimativa dos riscos.

3 ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

No que tange o estudo dessa dissertação, consideram-se diferentes tipos de comportamentos ao fogo para Pontes e Viadutos concebidas por concreto e o aço, dada a sua natureza (Quadro 3).

Quadro 3 – Comportamento de diferentes tipos de materiais de construção frente a ação do fogo.

Materiais de Construção Desprotegidos	Resistência ao Fogo	Facilidade de Combustão	Facilidade de Reabilitação pós incêndio
Aço	Muito Baixa	Nula	Baixa
Concreto	Alta	Nula	Alta

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Helene; Britez e Carvalho (2019)

Apesar de se observar o concreto como material estrutural com alta resistência ao fogo, combustão nula e de alta facilidade para reabilitação após o incêndio, o aço/armadura possui uma resistência baixa, e deve ser protegido pelo concreto. Destaca-se nesse caso a existência de procedimentos onde se analisa o comportamento das estruturas de concreto armado e protendido frente a ação do fogo mais a fundo.

3.1 Concreto

Helene; Britez e Carvalho (2019) afirmam que é conhecido no meio técnico que o concreto possui boa resistência ao fogo devido a suas características térmicas de incombustibilidade e baixa condutividade térmica. Em contrapartida, a medida em que a temperatura do fogo aumenta, sua resistência à compressão decresce, dada pelas expressões:

$$f_{ck,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck} \quad (1)$$

$$f_{cd,\theta} = f_{ck,\theta} \quad (2)$$

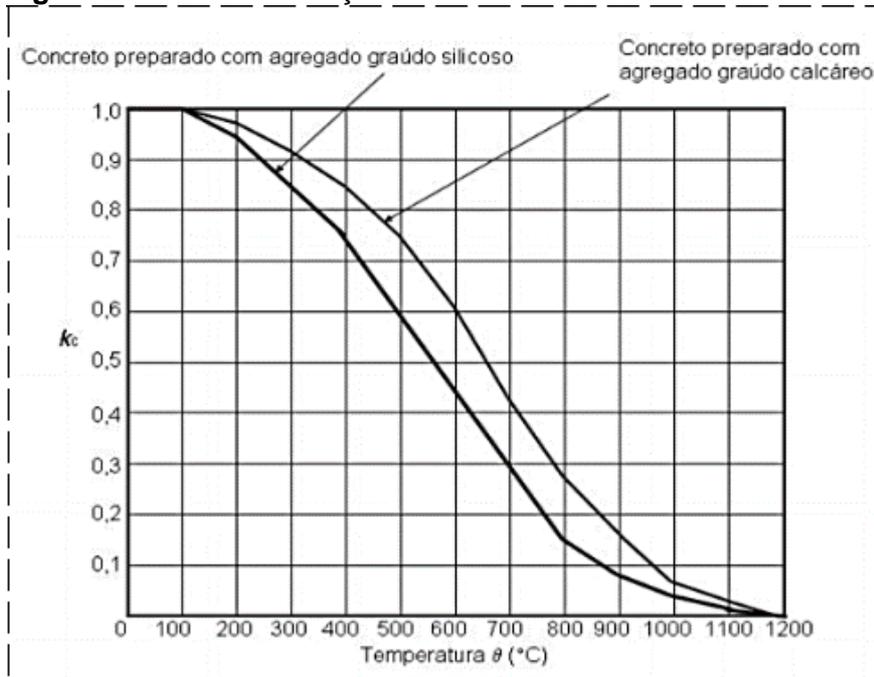
Sendo:

- = Resistência característica à compressão do concreto em situação normal;
- $f_{ck,\theta}$ = Resistência característica do concreto à compressão à temperatura elevada θ (MPa);

- c) $k_{c,\theta}$ = Coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto em função da temperatura θ (adimensional) específica de 2.000 a 2.800kg/m³ na temperatura θ ;
- d) $f_{cd,\theta}$ = Resistência de cálculo do concreto à compressão à temperatura elevada θ (MPa).

Os valores do coeficiente $k_{c,\theta}$ podem ser obtidos por meio da figura 27.

Figura 27 - Fator de redução da resistência do concreto.

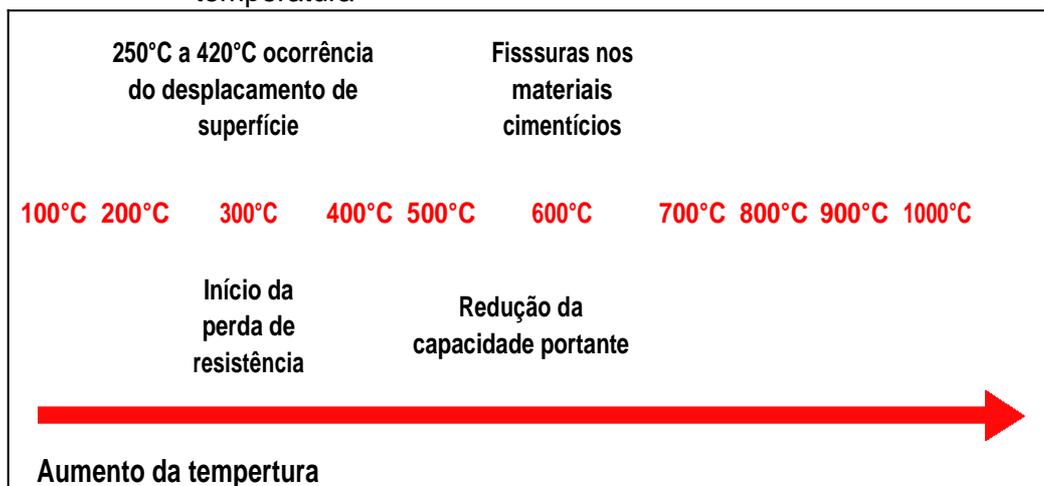


Fonte: Elaborado pelo autor com dados da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020)

Observa-se que o fator de redução aplicado ao concreto, de acordo com seu tipo de agregado, apresenta um pior comportamento ao fogo para concretos constituídos majoritariamente por agregados silicosos.

Bolina, Tutikian e Helene (2019), de maneira geral afirmam que além do concreto reduzir gradativamente sua resistência mecânica, também podem-se observar outras manifestações inerentes ao seu comportamento (Figura 28).

Figura 28 – Comportamento previsto do concreto em função do acréscimo na sua temperatura



Fonte: Adaptado de Bolina, Tutikian e Helene (2019) e KHOURY (2000)

O concreto exposto a elevadas temperaturas sofre em função das transformações químicas e alterações nos seus compostos hidratados.

Segundo Bolina, Tutikian e Helene (2019) as principais manifestações que as estruturas de concreto desenvolvem em situação de elevadas temperaturas são:

- a) deterioração mecânica;
- b) deformação térmica;
- c) deslocamento.

Referindo-se as principais transformações químicas dos agregados que podem ser vistas dependem diretamente da temperatura qual o concreto tende a se submeter (Quadro 4).

Quadro 4 - Transformações do Concreto submetido as altas temperaturas

Graus Celsius	Transformações do Concreto submetido as altas temperaturas
	Continua
20-80°C	Processo de hidratação acelerado, com perda lenta de água capilar e redução das forças de coesão.
100°C	Aumento acentuado na permeabilidade da água.
80-200°C	Aumento na taxa de perda da água por capilaridade e desidratação da água evaporável.
80-850°C	Perda da água quimicamente combinada do gel de cimento.
150°C	Primeiro pico de decomposição dos silicatos de cálcio (C-S-H).
300°C	Aumento considerável da porosidade e microfissuras.
350°C	Fragmentação de alguns agregados de rio.

Graus Celsius	Transformações do Concreto submetido as altas temperaturas
	Conclusão
374°C	Ponto crítico da água, liberação das águas livres.
400°C - 600°C	Dissociação do Ca(OH) ₂ em CaO e água.
573°C	Transformações dos agregados de quartzo e areia da forma teta para beta.
550-660°C	Aumento dos efeitos térmicos.
700°C	Descarbonatação do agregado calcário (CaCO ₃) em CaO e CO ₂ .
720°C	Segundo pico de decomposição do C-S-H e formação de Beta-C ₂ -S e Beta-C-S.
800°C	Substituição da estrutura hidráulica por uma cerâmica - modificação das ligações químicas.
1.060°C	Início da fusão de alguns constituintes.

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Battagin e Silveira (2018), Bolina, Tutikian e Helene (2019)

Além do aspecto químico em função das reações de combustão, a ação do fogo nas estruturas faz surgir mudanças visuais que ficam cada vez mais evidente à medida que a temperatura se eleva (Quadro 5).

Quadro 5 - Comportamento do Concreto submetido as altas temperaturas.

Aspecto Visual Superficial -Coloração	Graus	Comportamento do Concreto submetido as altas temperaturas
Normal	100°C	-
	200°C	Início da Perda de Resistência
	250°C	Ocorrência de deslocamentos superficiais
	300°C	
Avermelhado	400°C	Redução significativa da capacidade portante - Fissuração dos materiais cimentícios.
	420°C	
	500°C	
Laranja acinzentado	600°C	-
	700°C	-
	800°C	Fissuração generalizada e a temperatura do ar é máxima, no entanto as chamas podem alcançar até 1.000°C.
	900°C	

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Battagin e Silveira (2018), Bolina, Tutikian e Helene (2019)

3.1.1 O fenômeno do “*spalling*”

O destacamento explosivo do concreto acometido pela rápida elevação da temperatura durante uma situação de incêndio é usualmente conhecido no meio acadêmico internacional pelo termo “*spalling*”. Essa manifestação pode ser considerada e se apresentar de forma violenta ou não, e pode ser agrupada em 6 categorias, conforme apresentado em estudos da Fédération Internationale du Béton (2007):

- a) destacamento do agregado;
- b) destacamento explosivos;
- c) destacamento de superfície;
- d) escamações ou Descamações;
- e) destacamento em bordas;
- f) destacamento pós-resfriamento.

Segundo Fédération Internationale du Béton (2007) os três primeiros grupos (A, B e C) se manifestam prematuramente, ou seja, nas fases iniciais durante uma situação de incêndio. Observa-se durante uma situação de incêndio a possibilidade de ocorrerem combinações de destacamento apenas de um grupo, isoladamente, combinadas, ou de todos eles (Figura 29).

Figura 29 - Flambagem combinada ao deslocamento explosivo em pilar acometido pelo fogo.

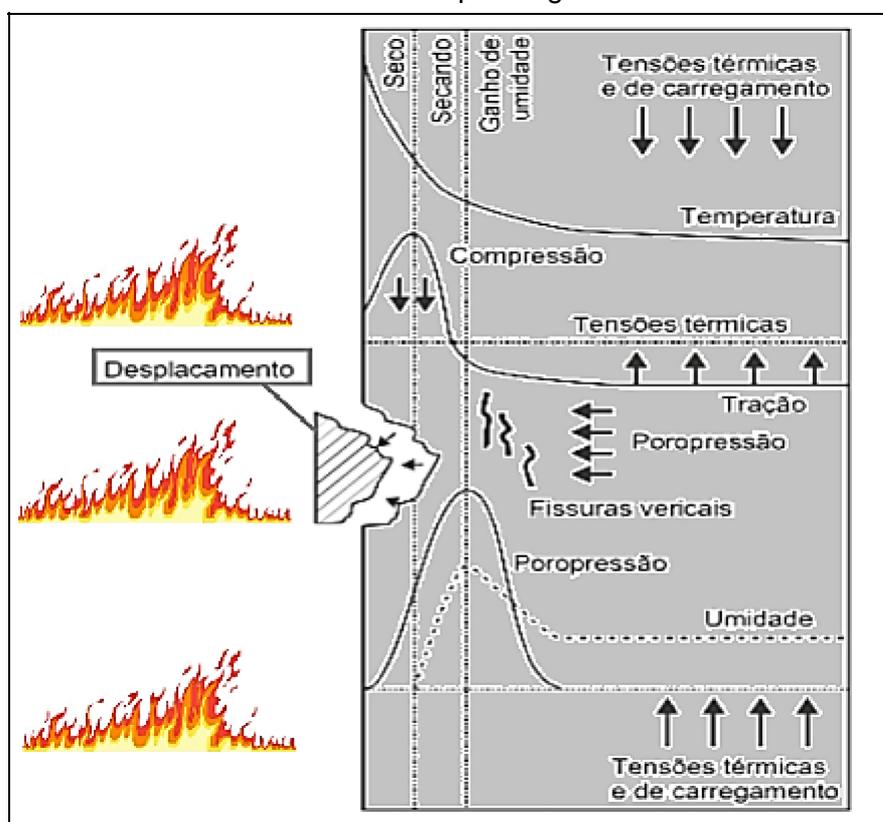


Fonte: Kodur (2005)

Apesar de existir uma linha tênue em relação a mensuração e classificação da divisão dessas manifestações, o fenômeno de “spalling” não pode ser interpretado como um fenômeno de falha ou colapso estrutural propriamente dito. Pois poderá conduzir ou não a uma rápida perda de seção resistente estrutural, no que desencadearia numa falha estrutural.

Já os demais grupos (D, E e F) ocorrem de maneira mais tardia, sendo os destacamentos de superfície e os destacamentos explosivos, considerados como as ações mais violentas do fenômeno (Figura 30).

Figura 30 - Decorrência de “spalling” mediante as interações internas do concreto acometido pelo fogo.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Fédération Internationale du Béton (2007)

Características do “spalling” tais como a extensão, a severidade e a natureza, são usualmente consideradas variáveis. Nesse sentido, observa-se a possibilidade de existirem significantes reduções das forças resistentes do elemento acometidos por essa manifestação, reduzindo a segurança estrutural durante uma situação de incêndio. Diante suas características, o “spalling” é um fenômeno que pode se

apresentar tanto de maneira pouco significativa quanto séria, tendo em vista uma condição em que o destacamento apresentado possibilita a exposição das armaduras embutidas no concreto durante uma situação direta ao incêndio.

Segundo Mehta e Monteiro (2006) o aço por si só, quando utilizado como solução estrutural possui um comportamento menos vantajoso em relação ao incêndio, comparado ao concreto. A madeira, quando comparada ao concreto e aço que são incombustíveis, pode emitir fumaças tóxicas quando exposto as altas temperaturas e, sem dúvida tem comportamento inferior.

O aço, quando comparado ao concreto, ao ser submetido a temperaturas na faixa de 700° a 800°C apresenta características que minoram significativamente sua capacidade resistente, o que pode acarretar em um colapso mais precoce da estrutura. A exemplo disso, em 1972, em um evento onde pode-se resgatar com segurança mais de 500 pessoas durante aproximadamente 4 horas de incêndio no Edifício Andraus, o mesmo era estruturado em concreto armado.

Nesse sentido, quando o aço é utilizado como solução estrutural, exige-se na maior parte das regulamentações, que o mesmo seja revestido com produtos à base de cimentícios na ordem 50mm a 100mm de espessura como camada de proteção e sacrifício.

Quadro 6 - Métodos cautelosos a serem considerados para o concreto contra “spalling” e perda de resistência.

Escolha do Tipo de Material		Ações preventivas
	Para a Prevenção Contra o “Spalling”	Para perda de Resistência
Agregado	Baixa expansão Térmica	Termicamente estável
	Estabilidade	Baixa Expansão Térmica
	Menor Tamanho	Superfície rugosa
		Geometria Angular
	Formulação contendo Sílica Ativa	
Cimento	Preferível sem Sílica Ativa	Para reduzir taxa C/S: Escória é mais eficiente que cinza volante; A Sílica Ativa desempenha o pior papel entre as 3 possíveis opções.
Fator Água/Cimento	Não tão baixo, se possível	Condições Hidrotérmicas podem se desenvolver em baixas relações A/C.
Fibras de Polipropileno	Requisito caso o concreto tenha baixa permeabilidade	Caso sejam formadas bolhas de ar durante a execução

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de KHOURY (2000) e Fédération Internationale du Béton (2007)

Segundo Mehta e Monteiro (2006), o cenário qual avalia o concreto submetido as altas temperaturas é complexo, devendo-se levar em consideração alguns fatores, tais como:

- a) permeabilidade do concreto;
- b) geometria da peça;
- c) temperatura de exposição.

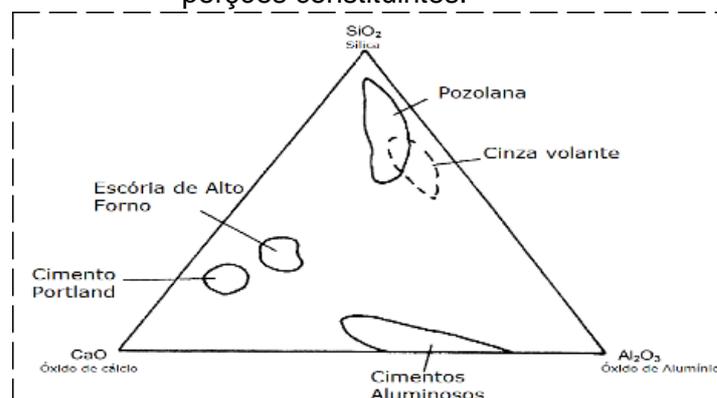
No que tange sua composição, a pasta hidratada de cimento e seus agregados, quando submetido a ação do fogo, mesmo tendo um melhor comportamento em relação aos outros materiais, também passa por decomposições relevantes a serem avaliadas (Quadro 6).

3.1.2 Efeito do fogo na pasta hidratada de cimento

Segundo Mehta e Monteiro (2006), a pasta do cimento é basicamente formada por silicato de cálcio hidratado (CSH), hidróxido de cálcio, sulfoaluminato de cálcio hidratado. Observa-se que na sua constituição também há o que autor considera como água total, soma entre a água livre e dos capilares na pasta hidratada de cimento.

Além do mais, destaca-se que a temperatura do concreto não terá grandes picos enquanto houver água total. Quando há grande quantidade de água total retida, combinada a uma característica de baixa permeabilidade da pasta, tem-se uma maior chance de deslocamento explosivo do concreto, ou “*spalling*” (Figura 31).

Figura 31 – Formação da pasta de cimento e representação das suas porções constituintes.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Fédération Internationale du Béton (2007)

Segundo Mehta e Monteiro (2006), o deslocamento explosivo surge quando as pressões de evaporação da água internas ao concreto crescem numa taxa superior as quais os poros são capazes de aliviar para a atmosfera:

- a) 300 graus é a temperatura suficiente para a perda de algumas camadas intermediárias de CSH e Sulfoaluminatos;
- b) 500 graus é a temperatura suficiente para iniciar a fase de decomposição do hidróxido de cálcio;
- c) 900 graus é a temperatura suficiente por decompor totalmente o CSH.

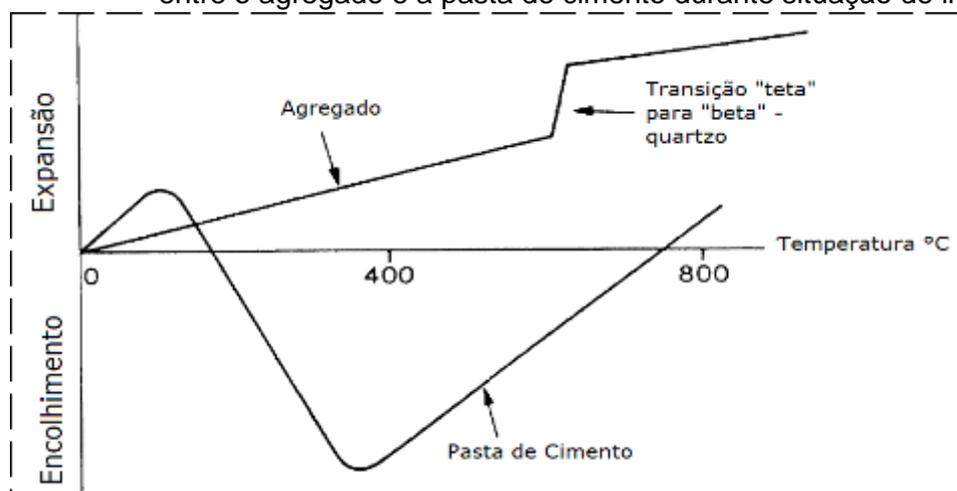
3.1.3 Efeito do fogo nos agregados

Segundo Coutinho (1999) as propriedades dos agregados com maior repercussão no comportamento do concreto no estado fresco são:

- a) granulometria;
- b) formas das partículas;
- c) porosidade;
- d) absorção;
- e) elasticidade;
- f) resistência mecânica;
- g) características superficiais das partículas.

Os diferentes tipos de agregados possuem características que são determinantes no seu comportamento quando acometidos pelo fogo. Segundo Mehta e Monteiro (2006), agregados com baixa porosidade costumam não apresentar problemas em função da sua movimentação hidráulica interna (Figura 32).

Figura 32 - Processo de Fadiga do concreto devido a incompatibilidade térmica entre o agregado e a pasta de cimento durante situação de incêndio.



Fonte: Mehta e Monteiro (2006)

Em linhas gerais, os agregados siliciosos, expostos a condição onde a temperatura atinja 550 a 600 graus são capazes de se expandir repentinamente.

Segundo Mehta e Monteiro (2006), verificou-se em seu estudo, uma expansão de 0.85%, o que causou uma fricção interna, conseqüentemente “soltando” o agregado no estado endurecido da pasta. No caso dos agregados de origem de rochas carbonosas, 700 graus é o suficiente para reagir através da descarbonização do agregado.

3.2 Aço

O aço no concreto, apesar de estar embutido na estrutura de concreto, é passível de sofrer a ação do fogo. Dessa forma, para se obter um melhor entendimento do seu comportamento frente a ação do fogo e a elevação da temperatura, descreve-se, para armadura passiva e ativa, as principais considerações técnicas feitas por importante autores nos tópicos em seguida.

3.2.1 Armadura Passiva

As armaduras passivas submetidas as elevadas temperaturas durante uma situação de incêndio têm suas características de resistência ao escoamento e módulo de elasticidades minoradas em função do aumento da temperatura do aço. Segundo Silva (2016) a expressão que é dada para esse fenômeno é representada por (3):

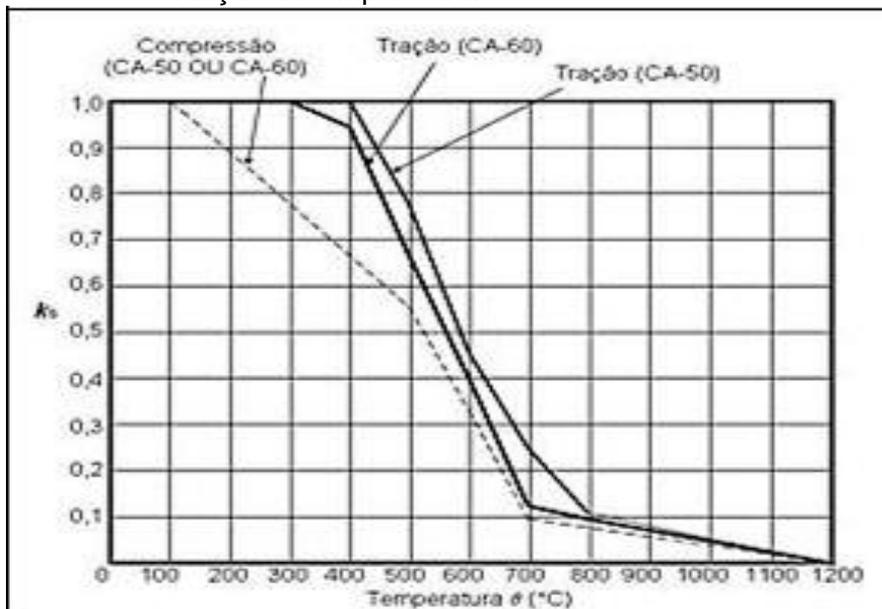
$$f_{yk,\theta=k} \quad (3)$$

Onde:

- f_{yk} é a resistência característica do aço de armadura passiva em situação normal;
- $k_{s,\theta}$ é o fator de redução da resistência do aço na temperatura θ , conforme a Figura 32;
- Curva cheia, $k_{s,\theta}$ sendo aplicável usualmente quando $\varepsilon_{yi} \geq 2\%$ para armaduras tracionadas de vigas lajes ou tirantes;
- Curva tracejada, $k_{s,\theta}$ sendo aplicável usualmente quando $\varepsilon_{yi} < 2\%$ para armaduras comprimidas de pilares, vigas ou lajes.

Observa-se a relação entre as armaduras passivas e a resistência do concreto quando submetidas a ação do fogo (Figura 33).

Figura 33 - Fator de redução de resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura.



Fonte: Silva (2016) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020)

Observa-se através da figura supracitada, que na temperatura de 100° graus, tanto o aço do tipo CA-50 quanto CA-60 ao serem solicitados a compressão, já se

aplicam fatores de minoração, diminuindo sua resistência originária. Em contrapartida, quando se tem o aço estruturalmente requisitado a tração, só se iniciam minorações de resistência a partir de 300 graus (CA60) e 400 graus (CA50), respectivamente.

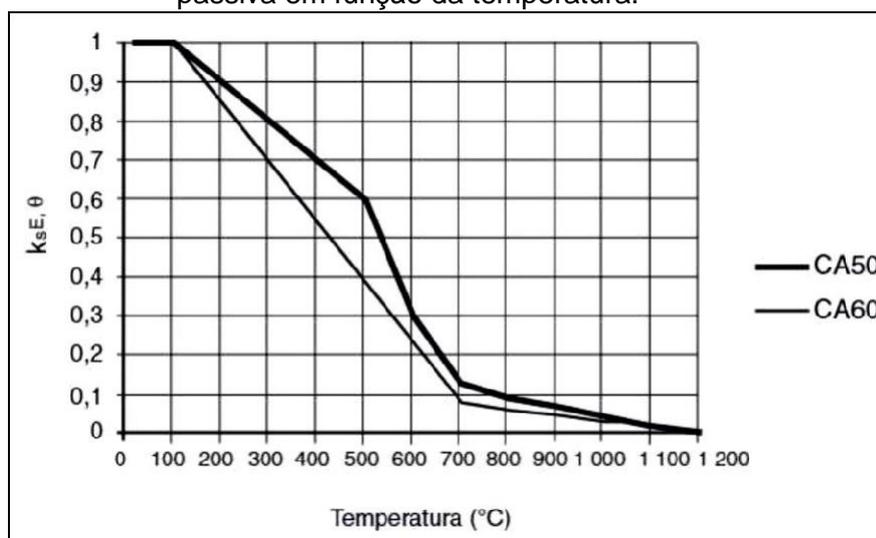
O módulo de elasticidade do aço de armadura passiva também decresce com o aumento das temperaturas, dada pela expressão (4):

$$E_{s,\theta} = k_{E_{s,\theta}} E_s \quad (4)$$

Onde:

$E_{s,\theta}$ é o módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em situação normal e $k_{E_{s,\theta}}$ é o fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em função da temperatura θ , conforme a Figura 34.

Figura 34 - Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em função da temperatura.



Fonte: Silva (2016) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020)

Observa-se que o módulo de elasticidade para os dois tipos de aço, não há comportamento significativamente distinto, onde se observa que com o incremento da temperatura, há de maneira geral um decréscimo de seus valores de módulo de elasticidade originários. Nesse sentido, é possível identificar as reduções a partir da temperatura de 100 graus, sendo o aço CA60, de maneira geral, mais afetado frente a ação do acréscimo de temperatura no intervalo de 200 a 1.000 graus.

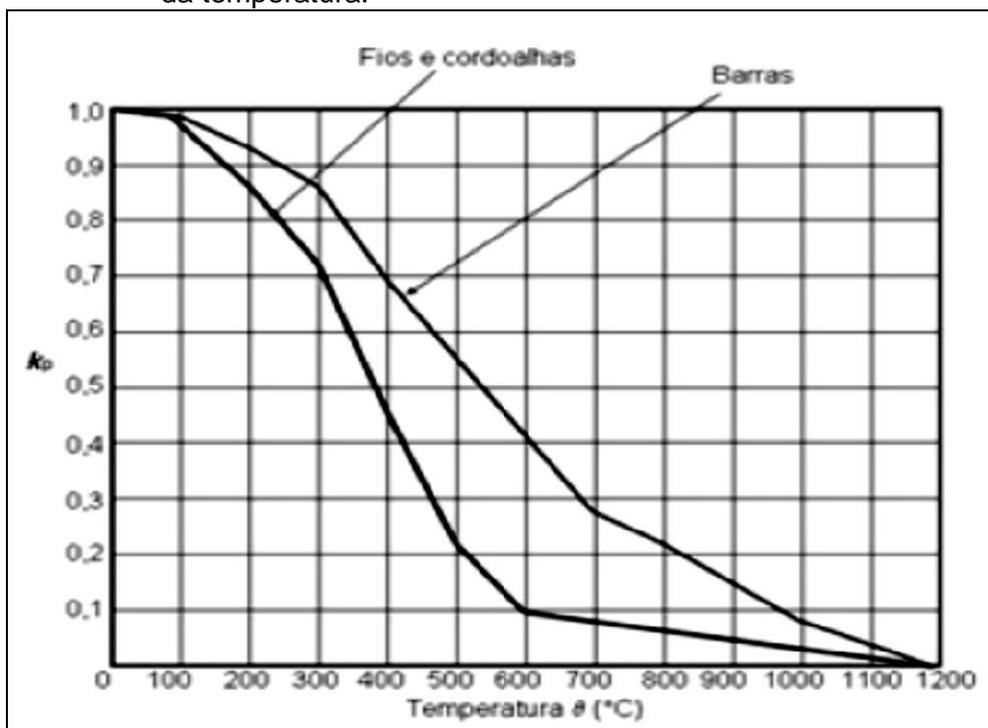
3.2.2 Armadura Ativa

As armaduras ativas, tais como fios ou cordoalhas e barras também sofrem devido a ação das altas temperaturas, tendo sua resistência diminuída mediante o aumento da temperatura, pode-se obter seus valores em função da equação a seguir:

$$f_{pyk,\theta} = k_{p,\theta} f_{pyk}$$

Onde f_{pyk} é a resistência do aço de armadura ativa em situação normal e $k_{p,\theta}$ é o fator de redução da resistência do aço de armadura ativa na temperatura θ conforme Figura 35:

Figura 35 - Fator de redução de resistência do aço de armadura ativa em função da temperatura.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020) e Silva (2016)

Nesse sentido, verifica-se que antes mesmo da temperatura atingir os 100 graus, já existe uma baixa pouco significativa nos valores de resistência para as armaduras supracitadas. Verifica-se também um pior comportamento dos fios e cordoalhas em relação as barras devido a elevação da temperatura, com isso, tendo sua resistência originária reduzida em cerca de 50% antes mesmo de atingir os 400

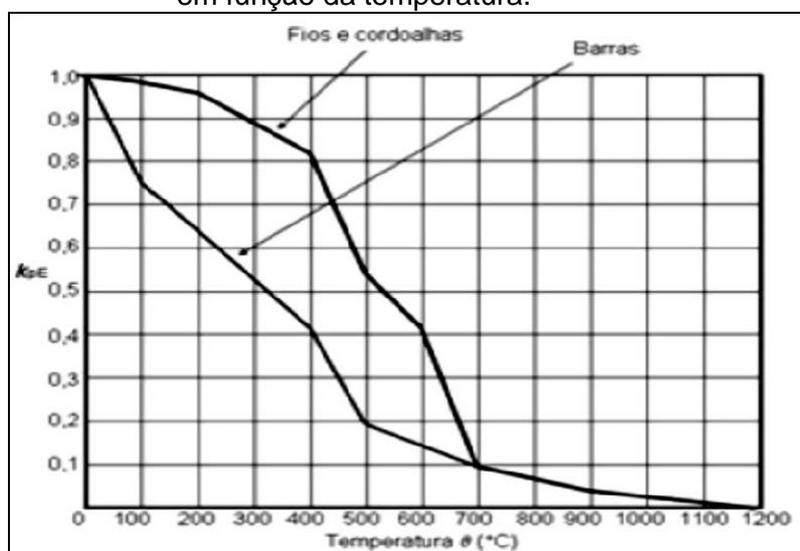
graus.

O módulo de elasticidade do aço de armadura ativa apresenta também um decréscimo de suas propriedades em função do aumento da temperatura, podendo ser obtida pela equação:

$$E_{p,\theta} = k_{E_{p,\theta}} E_p$$

Onde E_p módulo de elasticidade do aço de armadura ativa em situação normal e $k_{E_{p,\theta}}$ é o fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura ativa na temperatura teta, conforme a Figura 36.

Figura 36 - Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura ativa em função da temperatura.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020) e Silva (2016).

A partir do início do aumento da temperatura, antes mesmo de atingir os 100 graus as barras apresentam reduções aproximadas de 20% a 30% das suas propriedades originárias. Este mesmo comportamento para fios e cordoalhas só se apresentam a partir da faixa dos 400 a 500 graus. Verifica-se também, para ambos os tipos, o mesmo fator de redução ao se alcançar 700 graus celsius.

3.3 Métodos de resfriamento pós-incêndio

Segundo Silva (2016) o concreto armado acometido pelo fogo, pode perder até 10% da sua resistência característica, de acordo com o tipo método de resfriamento utilizado durante uma situação de incêndio. Ressalta-se também que os fatores de contorno para esta afirmação também estão diretamente relacionados aos valores da temperatura alcançada durante o fenômeno do incêndio e o método de resfriamento. Verifica-se que após a elevação da temperatura no concreto armado acometido pelo fogo, posteriormente há uma forma natural ou repentina para seu resfriamento (Figura 37).

Figura 37 - Extinção e controle de incêndio através de jatos pressurizados de água em Viaduto acometido pelo fogo.



Fonte: Timmerman (2021)

Para as o cenário relacionado ao tema da dissertação, verifica-se que podem existir diferentes métodos de resfriamento, sobretudo os mais comuns são os repentinos, aqueles que envolvem a água como agente resfriador, nesse sentido, na figura supracitada, observa-se a ação dos bombeiros no combate ao incêndio e resfriamento das estruturas, utilizando-se do agente extintor tipo mangueira pressurizada com água na região dos pilares e aparelhos de apoio do Viaduto.

Não tão menos semelhante, também podem ocorrer as ações através dos agentes do tipo extintores de incêndio propriamente ditos (Figura 38).

Figura 38 - Extinção e controle de incêndio através de extintores em Viaduto acometido pelo fogo.



Fonte: Timmerman (2021)

Observa-se acima a ação dos bombeiros no combate ao incêndio utilizando-se do extintor na região das bases dos pilares de um viaduto em São Paulo. De maneira geral, no que tange ao resfriamento de uma estrutura acometida pelo fogo, é comum notar que a mesma não volte a se apresentar com suas características mecânicas originárias, principalmente nas faces superficiais.

Já para o aço estrutural contido nos elementos de concreto submetido as elevadas temperaturas, considera-se uma real possibilidade de transformações em sua cristalografia, ou seja, transformações na disposição dos seus átomos, portanto irreversíveis. Logo, enquanto o aço não atinge seu ponto limite (ponto eutético = 720 graus), pode-se considerar que após seu resfriamento, o aço atingido pode se recuperar totalmente conforme suas condições originárias (Figura 39).

Figura 39 - Constatação da deformação do aço de armadura principal e seccionamento dos estribos dos pilares em um viaduto durante inspeção extraordinária devido a ação do fogo.



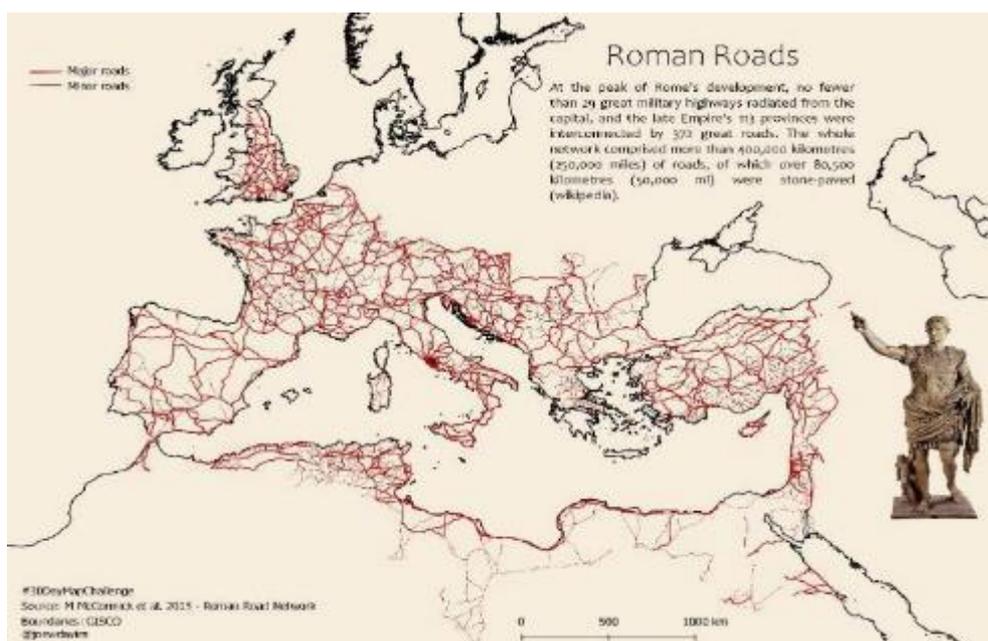
Fonte: Timmerman (2021)

Essas transformações estão diretamente ligadas a sua microestrutura onde Silva (2016) afirma que até na faixa dos 720 graus, ainda não há formação de perlita a partir da transformação da austenita presente no aço, o fenômeno é usualmente conhecido como ponto eutético.

4 PONTES

É de fundamental importância entender que as pontes além de serem sistemas fundamentais para o sucesso de uma estrada, via ou rodovia, também possuem fatores decisórios diante sua implantação. Com esse cenário, estima-se que o valor da sua implantação seja imensurável para o desenvolvimento de uma sociedade. A exemplo disto, tem-se historicamente as estradas implantadas e mantidas pelo Império Romano, mesmo império que foi palco do “grande incêndio” citado na introdução desta dissertação. Estima-se que ao todo, existiam cerca de 80.000 km de estradas, atravessando Europa e conectando parte da extensão litoral norte da África, conforme apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Representação das estradas Romanas.

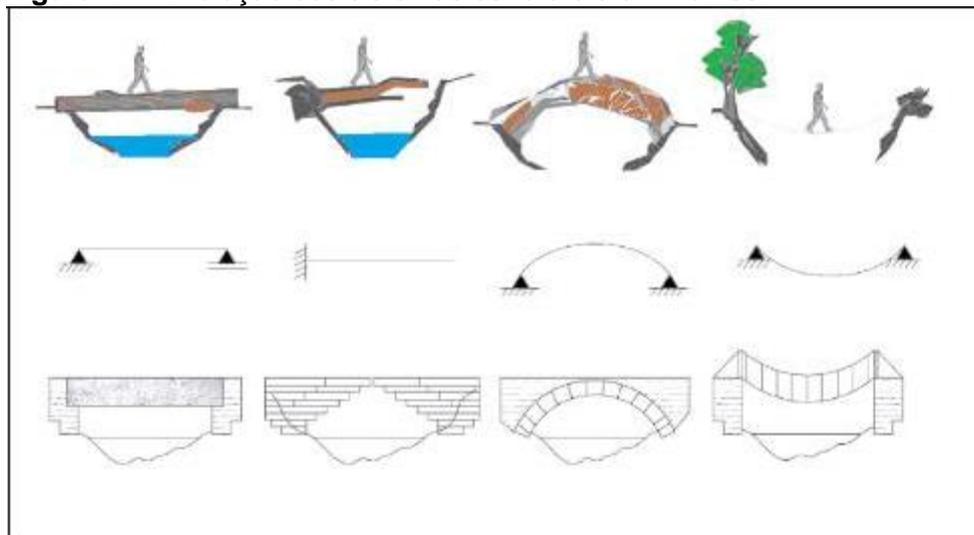


Fonte: McCornick *et al.* (2013 *apud* DAVIES, 2015)¹⁰.

Diante o avanço das estradas, surgiram as necessidades usuais de se transporem obstáculos que se apresentavam. Dessa forma, o homem utilizou como inspiração, ferramentas e artimanhas de transposição que tem como base a matéria prima advinda da natureza, apresentado na Figura 41.

¹⁰MCCORNICK, M. *et al.* **Roman roads network**. 2013. Disponível em: https://www.reddit.com/r/MapPorn/comments/jw3e0e/map_of_roman_roads. Acesso em: 28 maio 2022.

Figura 41 - Evolução dos sistemas estruturais em Pontes.



Fonte: Valeriano (2021)

Para tanto, citam-se os primordiais e principais sistemas para as transposições, sendo usualmente conhecido no meio técnico atual como sistemas: biapoiados, em balanço, em arco e pênsil.

É comum, embora sejam poucas, nos dias de hoje se observar algumas estruturas antiquárias mediante seu estado de conservação. A exemplo disto, cita-se como marco do desafio, a ponte a ponte pré-histórica “*Taar Steps*”, presente até então nos dias atuais, na Inglaterra Figura 42.

Figura 42 - Ponte pré-histórica e bi-apoiada em pedra denominada “Tarr Steps”.



Fonte: Valeriano (2021)

Referente a ponte pré-histórica, observa-se um sistema biapoiado em pedras. Devido sua maneira simples e prática de se construir, essa era e até os dias de hoje é tipologia frequentemente utilizada.

4.1 Classificação da Pontes e Viadutos

Segundo Valeriano (2021), as pontes ou viadutos são usualmente classificadas e discutidas como obras de arte especiais – OAE's , nomenclatura que tem como objetivo a distinção das obras de artes correntes, que valem-se basicamente de pontilhões e bueiros. Com isso, as transposições correntes, sejam em rodovias, ferrovias ou hidrovias são feitas por estruturas típicas de uma ponte, variando sua nomenclatura mediante as características do obstáculo, podendo ser: uma ponte, viaduto, elevado, passarela, aqueduto, cais, píer, ponte verde ou ponte viva. Contudo, apresenta-se também segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019a), a norma vigente da ABNT NBR 9452, a classificação das estruturas de maneira geral em ponte, pontilhão, viaduto e passarela como Obras de Arte Especiais – OAE's. A fundo, para Marchetti (2018), optou-se por as classificar Pontes e Viadutos os parâmetros descritos no quadro abaixo (Quadro 7):

Quadro 7 – Parâmetros de classificação das Pontes e Viadutos.

Item	Parâmetros	Exemplos
		Continua
1	Extensão do vão	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bueiros (até 2,00 metros); 2. Pontilhões (2,00 a 10,00m); 3. Pontes (maior que 10,00m).
2	Durabilidade	<ol style="list-style-type: none"> 1. Permanentes (Caráter definitivo); 2. Provisórias (Duração limitada); 3. Desmontáveis (Reaproveitáveis);
3	Natureza do Tráfego	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ponte Rodoviárias; 2. Passarelas; 3. Arquedutos; 4. Mistas; 5. Ferroviárias; 6. Canal; 7. Aeroviárias.
4	Desenvolvimento planimétrico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Retas – Ortogonal ou Esconsa; 2. Curvas.
5	Desenvolvimento altimétrico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Horizontais ou em nível; 2. Rampa, retilíneas ou curvilíneas.

Item	Parâmetros	Exemplos	Conclusão
6	Sistema estrutural da superestrutura	<ol style="list-style-type: none"> 1. Em vigas; 2. Porticos; 3. Arco; 4. Penseis; 5. Atirantadas. 	
7	Material	<ol style="list-style-type: none"> 1. Madeira; 2. Pedras ou Tijolos; 3. Concreto Armado; 4. Concreto Protendido 5. Aço 	
8	Posição do tabuleiro	<ol style="list-style-type: none"> 1. Superior; 2. Intermediário; 3. Inferior. 	
9	Mobilidade dos tramos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ponte basculantes pequeno vão; 2. Ponte levadiça; 3. Ponte corredeira; 4. Ponte giratória. 	
10	Modelo estático	<ol style="list-style-type: none"> 1. Isoestáticas; 2. Hiperestáticas. 	
11	Modo construtivo da superestrutura	<ol style="list-style-type: none"> 1. Executada "in loco"; 2. Pré-Moldada; 3. Balanços sucessivos; 4. Aduelas ou segmentos. 	

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Marchetti (2018)

Segundo Marchetti (2018) a natureza dos materiais mais encontrados e que compõe pontes ou viadutos de maneira geral, podem ser a madeira, alvenaria (pedras ou tijolos), concreto armado e/ou protendido e o aço. No que tange o presente trabalho, explanam-se cenários possíveis de identificar a presença do fogo em pontes, viadutos e passarelas constituídas predominantemente em concreto, formada por armadura passiva e ativa.

Conforme apresentado por Montoya em seu manual de Pontes (2016) a escolha da melhor concepção de uma Ponte ou Viaduto depende de uma análise prévia e atendimento a alguns ou mais de um dos seguintes fatores:

- a) Função;
- b) Topografia local e Natureza do solo;
- c) Extensão e vão livre necessário;
- d) Gabaritos a serem obedecidos;
- e) Acessos e localização;
- f) Tempo de execução e de interdição;

g) Custos da obra e de manutenção.

Além disto, as Pontes e Viadutos é usualmente conhecida a divisão estrutural em três subsistemas, formando-se pelos elementos de sua superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura, apresentado conforme na Figura 43.

Figura 43 - Subsistemas que compõe uma Ponte ou Viaduto.



Fonte: Acervo pessoal

As condições básicas e necessárias para o bom atendimento de Ponte ou Viaduto são as expectativas da população e meio técnico envolvido de acordo com sua funcionalidade, segurança, estética, economia e sem dúvidas sua durabilidade.

Segundo Marchetti (2018), a funcionalidade de uma Ponte ou Viaduto é condicionada ao nível de cumprimento, principalmente, das exigências de tráfego e vazão de veículos ou pessoas.

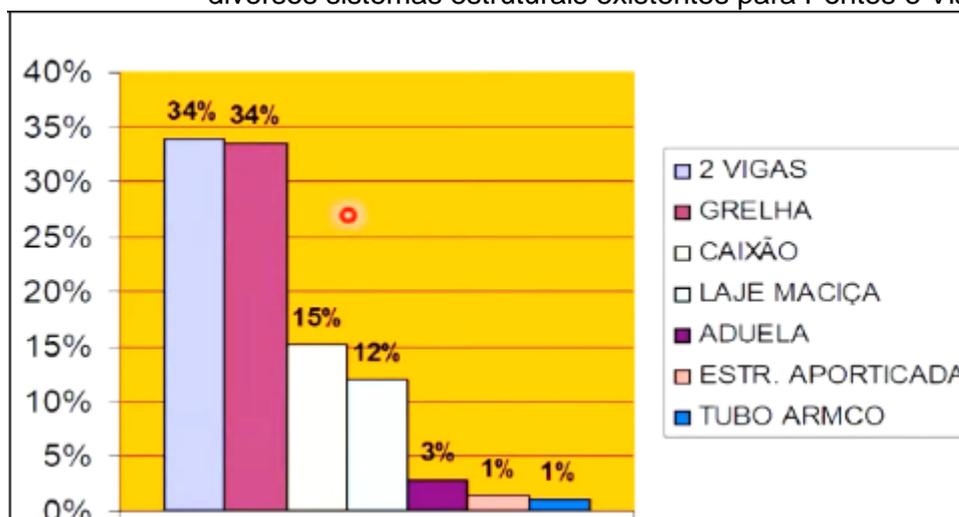
Sua segurança está relacionada as condições em que se encontram as resistências dos materiais constituintes quanto a resposta aos esforços solicitantes, sendo ideal que as forças resistentes sejam suficientemente maiores que as tensões de ruptura.

Na questão estética da ponte, deve-se apresentar um aspecto agradável, que possa gerar harmonia no ambiente onde se encontra. A economia é vista diante o estudo comparativo de diversas soluções, desde que atendido todos outros parâmetros supracitados.

Por fim, de acordo no que tange sua tipologia (Figura 43), afirma-se que a

durabilidade deve atender as exigências de uso durante o período previsto na fase de projeto (Figura 44).

Figura 44 - Representatividade para cada tipologia estrutural dentro os diversos sistemas estruturais existentes para Pontes e Viadutos



Fonte: Timmerman (2018)

Percebe-se então que a taxa de propagação e deterioração do fogo torna-se diferente a depender não só do tipo de material, mas também da sua localidade e configuração. O fogo, além de afetar diferentemente no aspecto estético dessas estruturas, pode prejudicar o aspecto funcional e estrutural, a depender do cenário e quão intenso foi (Figura 45).

Figura 45 - Ocorrências de deslocamentos explosivos em face Inferior de Ponte com elevada abrangência de armaduras exposta que estavam embutidas no concreto.



Fonte: Timmerman (2021)

4.1.1 Superestrutura

É composta por lajes e vigas principais ou secundárias, formando a região usualmente conhecida por tabuleiro, que é a parte útil da obra. Seus elementos recebem diretamente os esforços das cargas e o transmitem para mesoestrutura e infraestrutura.

Segundo Montoya (2016), a superestrutura de uma Ponte ou Viaduto é composta por elementos principais, que são aqueles dispostos longitudinalmente no tabuleiro, e secundários, quais são responsáveis pelo equilíbrio e melhor distribuição de cargas, tendo como objetivo o contraventamento dado no sentido transversal da mesma. Suas configurações estruturais mais usuais são de características isostáticas e hiperestáticas.

A ABNT NBR 9452 indica que também faz parte da superestrutura de uma ponte, vigas em arco superior, intermediário ou inferior, bem como por estais. Pode-se afirmar também que existem casos em que a superestrutura transmite suas cargas diretamente para a infraestrutura. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019a)

4.1.2 Mesoestrutura

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019a) a ABNT NBR 9452 é formada por todos os elementos da Ponte e Viaduto que comunicam as cargas da superestrutura para a infraestrutura, sendo composta pelos aparelhos de apoio, vigas travessas, viga de travamento de pilares, pilares, pilones, pórticos. Autores como Montoya (2016), atribuem os elementos denominados encontros, como elementos de mesoestrutura, embora não seja indicado na ABNT NBR 9452.

Os aparelhos de apoio, basicamente estão divididos entre fixos e móveis, sendo responsáveis e enquadrados de acordo com seu comportamento a compressão, rotação e deslocamentos.

a) fixos:

- a) freyssinet;
- b) articulações metálicas;
- c) chapas metálicas rígidas

b) móveis:

a) aparelhos de rolo;

b) aparelhos elastoméricos

Os pilares são compostos em sua maioria por concreto armado, que é o material mais utilizado nessa função segundo Montoya (2016). Sua forma geométrica está atrelada as características de altura e importância dos esforços horizontais. A título de detalhamento, podem ser divididos em dois grandes grupos, sendo os pilares de pequena e de grande altura.

Os encontros exercem a função de aproximação da ponte, bem como são fundamentais para a proteção do aterro contra erosão, podendo também ser considerados como contenções. Geralmente nesse ponto, são usuais de se encontrarem taludes, muros de alvenaria de pedra, muros em concreto armado e cortinas atirantadas.

4.1.3 Infraestrutura

É composta por todos elementos capazes de transmitir e distribuir corretamente os carregamentos ao terreno. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019a) ABNT NBR 9452, a infraestrutura é formada por viga de travamento de blocos de fundação, viga-alavanca, tubulões, estacas, sapatas, bloco sobre estacas e blocos de transição.

4.1.4 Elementos principais, secundários e complementares

Tratam-se como elementos, os componentes que formam os subsistemas estruturais de uma ponte. Com isso, atribui-se aos elementos principais, aqueles quais cujo os danos possam ocasionar algum tipo de colapso parcial ou total da obra, portanto o mais crítico. Já os secundários, são aqueles quais os danos, em menor grau, possam se manifestar de maneira localizada, em parte de um vão.

Para os elementos complementares, a ABNT NBR 9452:2019 indica que seus danos não causam nenhum tipo de problema estrutural, mas sim perdas quanto a funcionalidade e durabilidade da ponte. Portanto, tem-se como elementos complementares de uma ponte, partes funcionais de segurança, drenagem e de

transição da estrutura, por exemplo: barreiras rígidas, guarda-corpos, telas de proteção (gradil), muretas, pavimento, juntas de dilatação, sinalização viária, postes de iluminação, taludes, buzinos, pingadeiras e utilidades indexadas na ponte. Associação Brasileira de Normas Técnicas(2019a)

5 INSPEÇÕES DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS

As inspeções das estruturas são importantes ferramentas pois permitem coletar informações reais sobre a situação encontrada no ativo. Tratam-se de ações chave no gerenciamento de ativos, determinantes quanto as atitudes que vão conduzir o responsável em como e quando tomar a melhor decisão.

5.1 Inspeções (ABNT NBR 9452:2019)

A norma brasileira ABNT NBR 9452 - Vistoria de pontes, viadutos e passarelas de concreto sofreu revisões em 2016 e 2019. Todavia, observa-se que houve um intervalo que perdurou 20 anos sem publicações, sendo somente em 2016 a primeira revisão após sua primeira publicação. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019a)

No que tange o conjunto da obra, pode-se agregar itens importantes de diversos outros documentos que fazem referência ao tema. Verifica-se segundo Bertrand (2018) que nesse intervalo de tempo, alguns outros importantes documentos foram elaborados e publicados por outras autarquias. Nesse sentido, tem-se como principais referências nacionais que contribuíram para o cenário que trata inspeções em Obras de Artes Especiais no Brasil, os seguintes documentos.

- a) IP-DEC00/009: Inspeção de Obra de Arte Especial elaborado pelo DER-SP em 1996;
- b) ET021: Controle das condições estruturais, funcionais e de durabilidade de Obras de Arte Especiais editado pela ARTESP em 1999;
- c) DNIT PRO 010: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido publicado pelo DNIT em 2004.

Identificou-se que de maneira geral que pouco são tratadas as questões que envolvem a ação excepcional do fogo nas documentações supracitadas. Exceto quando se arremete a necessidade de formação de equipe especializada visando atender a especificidade e tipo qual a estrutura foi submetida. Verifica-se também que o documento DNIT PRO 010, um dos principais documentos devido sua abrangência federal, portanto sendo um dos principais documentos vigentes até publicação da ABNT NBR 9452:2019, que nada se refere a questões que envolvem a ação do fogo.

(DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2014). No que tange a ABNT NBR 9452: 2019, verifica-se a descrição e classificação de quatro tipos de inspeção. Sendo elas a inspeção cadastral, rotineira, especial e extraordinária. No tocante às deteriorações e manifestações patológicas, observa-se a separação por elementos de superestrutura, meso e infraestrutura. Identifica-se também a classificação do dano atribuído ao tipo de elemento, se é principal e secundário. O dano principal é aquele passivo de causar colapso parcial ou total da obra, já o secundário causaria apenas uma ruptura localizada. Observam-se no documento, menções feitas a danos nos elementos complementares, cujo o dano a priori não causaria avarias estruturais, mas que implicariam numa menor segurança de uso para o usuário, seja o motorista ou o pedestre. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019a)

Atualmente, verifica-se que o documento DNIT 010/2004-PRO – “Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento”, bem como a e ABNT NBR 9452:2019 – “Inspeção de Pontes, viadutos e passarelas de concreto”, como sendo as normas mais utilizadas. Ambas permitem classificar essas estruturas através da atribuição de uma nota técnica que pode variar de 1 (Pior condição) a 5 (melhor condição).

Assim como a norma ABNT NBR 9452:2019, a classificação dada pelo documento DNIT 010 para a estrutura varia de “1” até “5”, onde “1” caracteriza um estado crítico exigindo intervenção imediata; “2” descreve obra em estado ruim; “3” indica obra em estado regular; “4”, a denominação para obra em bom estado e “5” atribuído a obras em excelente. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019a); (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2014).

5.1.1 Inspeção Cadastral

A inspeção cadastral tem o objetivo de inserir a Ponte ou Viaduto, nova ou antiga no rastreamento dos sistemas de gerenciamento, caso exista. Pode ser de comissionamento, ou seja, logo após sua conclusão ou não. Inicialmente, devem ser armazenados dados coletados, tais como: ano da construção, construtora, localização, históricos de construção, existência ou não de projeto, alterações não previstas, ocorrência de reparos reforços e entre outras especificidades.

Observa-se também a necessidade de se descreverem a presença e características geométricas, de largura total do tabuleiro, faixas de rolamento, com respectivos sentidos, presença de sinalizações horizontais e verticais de segurança, passeios, barreiras rígidas; tipologia, quantidade e comprimento dos vãos, obstáculo transposto, aparelhos de apoio, das vigas longarinas e transversinas, pilares e juntas de dilatação, gabaritos verticais.

Ao fim do relatório cadastral, basicamente é necessário descrever as principais anomalias constatadas, croquis em planta, registro fotográfico e a classificação da estrutura de acordo com a respectiva nota.

Para o autor, um ponto chave para a prevenção contra incêndio no cadastro de uma PONTE E VIADUTO pode ser dado em função da coleta de informações que são pouco discutidas atualmente, pertinentes ao histórico de acidentes envolvendo veículos que transportam líquidos inflamáveis sob e sobre a estrutura, o histórico e a presença com nível de ocupação por parte da população em situação de rua, apropriação e uso por terceiros, bem como o risco de incêndio florestal.

5.1.2 Inspeção Rotineira

As inspeções rotineiras são anuais, e tem como objetivo acompanhar o surgimento e evolução das manifestações patológicas, a partir da inspeção anterior. A inspeção rotineira é dotada de um breve registro fotográfico de maneira trivial, abordando os pontos mais importantes a partir da ótica do inspetor e pode antecipar a possibilidade de inspeção especial a partir de indicativos mais relevantes, ou seja, sempre que a nota da rotineira indicar classificação igual a “1” ou “2”.

5.1.3 Inspeção Especial

A Inspeção Especial é tratada de forma similar ao que chamamos na medicina de “*check-up*”. Esse tipo de inspeção é realizada a cada cinco anos, postergando-se ao máximo para oito anos, caso a obra permanecer entre as notas “4” e “5”.

Tratando-se de uma verificação mais detalhada, essa inspeção abrange as verificações das faces internas das vigas de seção celular, usualmente conhecidos como “caixões perdidos”. Nessa fase, realizam-se os mapeamentos detalhados das

anomalias, indicando seu tipo, condição, dimensão e localização na estrutura. De maneira complementar, também são realizados ensaios, assim permitindo uma maior coleta de dados relevantes para a determinação do diagnóstico da estrutura. Portanto o documento final da estrutura é dividido em duas partes, o estudo de patologia e as medidas para a terapia da estrutura.

Não obstante, as inspeções especiais podem requerer especialidades distintas para a avaliação. Dentre as mais usuais, pode-se verificar a presença de engenheiro especialista em análises estruturais, hidrologia e geotecnia. Caso seja, necessário, faz-se também presente profissionais com expertise em monitoramento e controle de estruturas para acompanhamento de possíveis provas de carga e outros tipos de instrumentações.

5.2 Conceito básico sobre gerenciamento de Pontes e Viadutos

No sentido literal da palavra, entende-se por gestão, o ato de gerenciar, que é a medida de cadastramento e de coleta, por um determinado período, de dados ou informações que permitam organizar, planejar e executar uma medida.

Com base na cultura ocidental consultada, verifica-se que apenas na década de 70, nos Estados Unidos, surgiram movimentos no sentido da aplicação do gerenciamento de Pontes. Sendo eles, o colapso da Ponte Silver em Ohio acarretando na materialização do Manual de Inspeção de Pontes (1971) e o estabelecimento do Inventário de Pontes dos Estados Unidos (National Bridge Inventory – NBI), segundo Muratori (2001).

Segundo Muratori (2001), a falta de uma política preventiva aliada a escassez de dados faz com que a grande maioria das Pontes e Viadutos no Brasil precisem de alguma intervenção ou reparo, portanto, sendo um ponto crítico ao país. Como forma de mudança de paradigma a implantação de um Sistema de Gerenciamento de Pontes –SGPo, tem se apresentado uma excelente ferramenta, auxiliando no cadastramento de inspeções e registro de informações. Conseqüentemente essas ações resultam numa alocação racional de recursos mantendo essas infraestruturas em nível de serviço adequado.

A nível municipal e estadual, não se tem conhecimento de nenhum sistema implantado de gerenciamento de pontes. Sobretudo, a nível federal, por meio do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes – DNIT, sabe-se da

existência, desde 1994, do Sistema de Gerenciamento de Obras de Artes especiais – SGO. Nesse sentido, até então foram cadastrados 6.550 Pontes e Viadutos, conforme apresentado por Silva et al. (2021). Contudo, Timmerman (2018) afirma que no Brasil existem aproximadamente 137 mil Pontes e Viadutos, sendo 9 mil delas concessionadas, portanto, representando, de maneira geral, que pouco menos que 10% das pontes brasileiras possuem um sistema de gerenciamento implantado.

Com intuito de ampliar os olhares, podemos comparar dados relativos ao gerenciamento de pontes na Europa e no Brasil, apresentado o sistema existente e a quantidade de Pontes e Viadutos cadastradas, conforme quadro 8:

Quadro 8 – Visão geral dos cadastros de Pontes e Viadutos feito em Sistemas de Gerenciamento de Pontes no Brasil e Europa.

	País	Software/Sistema	Quantidade de Pontes
	Dinamarca	DANBRO	2.250
	Finlândia	FBMS	17.065
	Alemanha	GBMS	46.500
	Irlanda	EIRSPAN	2.900
	Itália (Trente)	APTBMS	1.024
	Holanda	DISK	5.018
	Polonia	SMOK	Sem dados
	Espanha	SGP	35.719
	Suécia	BatMan	35.370
	Suiça	KUBA	9.372
	Rússia (Moscou)	MOST	480
	Brasil	SGO	6.550

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Silva *et al.* (2021) e Urzaiz (2020).

Verifica-se que a Alemanha, Espanha e a Suécia são os países que apresentam os maiores números de cadastrados de Pontes e Viadutos aos seus respectivos sistemas de gerenciamento. Embora implantado apenas no âmbito federal, não sendo levado em consideração a extensão territorial nem a malha rodoviária e ferroviária, o Brasil ainda se apresenta com números a frente de países como Dinamarca, Irlanda e Holanda.

5.3 Estado da Arte: incêndio em Pontes e Viadutos no cenário internacional

Verifica-se nos dias de hoje que não existem normas específicas para segurança contra incêndio de pontes em diferentes jurisdições nacionais da América ou Europa. O que há, de mais próximo são apenas orientações mínimas para se estabelecer a segurança em possíveis incêndios apresentados pela *National Fire Protection Association* (2014) em seu documento intitulado NFPA 502. Ainda mais, segundo Naser e Kodur (2015), não é econômico ou viável fornecer resistência ao fogo para todas as pontes contra a ameaça de incêndio. Nesse sentido, segundo Gales, Nicoletta e Kotsovinos (2019), em alguns casos é preciso limitar riscos potenciais ao incêndio, bem como garantir um retorno ao pico de tráfego seguro. No que tange o gerenciamento desses ativos, essas são as principais características de projeto de uma Ponte ou Viaduto, visando a resiliência ao fogo.

Segundo Gales, Nicoletta e Kotsovinos (2019) é possível identificar que as pontes e viadutos podem variar suas características, assim como oferecer diferentes níveis de serviço para a comunidade beneficiada. Geralmente se observa através da ocorrência de algum fenômeno acidental, se essas estruturas podem ser redundantes ou não. Isso se dá devido ao impacto limitado associado ao seu fechamento, e críticos quando decorre de efeitos prejudiciais nas operações de tráfego em caso de fechamento.

Além disso, se uma ponte for considerada resistente ao fogo, deve-se tomar cuidado para avaliar os possíveis riscos de incêndio que ela pode enfrentar durante sua vida útil e o projeto subsequente deve responder alinhado com essa expectativa.

Quadro 9 - Revisão Bibliográfica do tema estudado sobre o risco de incêndio em Pontes e Viadutos (todos os tipos).

Título do Trabalho	Autor e Ano	Tópico de pesquisa	Sinopse
continua			
Revisão do estado da arte e avaliação dos riscos ao fogo em Pontes	Kodur <i>et al.</i> (2010)	Visão geral sobre potenciais riscos criados pelo fogo e considerações de projeto	Esse documento detalha potenciais riscos de fogo e significantes estudos de caso. Problemas e nichos conhecidos na literatura, bem como uma metodologia de projeto é apresentada
Vulnerabilidade de pontes ao Fogo	Giuliani <i>et al.</i> (2012)	Discussão da necessidade de um código específico com requisitos e revisão de casos conhecidos	Os autores fizeram uma diferenciação entre incêndios residenciais e os acontecidos em pontes. Observa-se estudo de caso e análises, onde verificou-se que a maioria desses incêndios se dão em função de acidentes envolvendo caminhões tanques, bem como maioria das pontes não colapsam. Também evidenciam que um maior número de incêndios acontece no dia-dia que de fato são reportados.
Riscos de Pontes ao fogo: Revisão, avaliação e estratégias de reparo	Garlock <i>et al.</i> (2012)	Revisão detalhada de eventos relevantes de incêndio em pontes, estado da arte, boas práticas para reparos e avaliações, nichos do tema	É a primeira e principal para a questão da segurança contra incêndio em pontes. São discutidos detalhes de incidentes reais de incêndio em pontes e estudos de pesquisa relevantes. As melhores práticas de avaliação pós-incêndio e técnicas de reparo em pontes de concreto e aço são apresentadas para informar profissionais e pesquisadores, lições aprendidas através de estudos de caso
Avaliação de Risco de Incêndio em Pontes Rodoviárias com Modelo computacional térmico mecânico	Woodworth <i>et al.</i> (2015)	Dissertação sobre avaliação do risco de incêndio em ponte através de análise estatística e modelagem termo estrutural de um incêndio em ponte com os softwares FDS e ABAQUS	Uma revisão de dados estatísticos descobriu que incêndios florestais e detritos (lixo) ocorrem com maior frequência quando comparados a incêndios em veículos em pontes. Sobretudo são pequenos em gravidade e não são relatados. As pontes rodoviárias interestaduais têm o maior risco de incêndio e maioria dos incêndios em veículos ocorrem nas áreas rurais onde as taxas de acidentes são maiores.

Título do Trabalho	Autor e Ano	Tópico de pesquisa	Sinopse
			continuação
Relatório de Avaliação de Incêndio em Ponte Rodoviária	Wright <i>et al.</i> (2013)	Um relatório sobre riscos de incêndio em pontes com base na revisão de estudo de caso e de modelagem de cenário	O principal risco a considerar é a perda do serviço da ponte. Observa-se também que é razoável estimar que pelo menos uma ponte perca permanentemente o serviço devido a um incêndio por ano nos EUA
Avaliação Probabilística para Classificação de Pontes Contra Risco de Incêndio	Naser and Kodur (2015)	Apresenta um método racional para avaliar o risco de incêndio da ponte, bem como apresenta a vulnerabilidade e potenciais riscos de incêndio	O estudo permite a avaliação e identificação de pontes criticamente vulneráveis com base nas suas características e tipos de tráfego
Retroanálise de uma ponte danificada pelo fogo	Alexander Au (2016)	Avaliação pós-incêndio, reparo e testes de longo prazo em um viaduto de concreto acometido por incêndio.	Provas de carga realizados 6 anos após os reparos pós-incêndio encontraram pouca deterioração na resistência. No entanto, as técnicas de reparo adotadas no pós-fogo foram consideradas de acordo
Projeto Estrutural de ponte resiliente ao carregamento extremo de incêndio	Mueller <i>et al.</i> (2016)	Metodologia de projeto de pontes resistentes ao fogo onde foi aplicado um estudo de caso.	A estrutura proposta estabeleceu com sucesso a ameaça máxima de exposição ao fogo. O projeto considera possíveis estados de dano ao fogo aceitáveis contra projeto sem essas considerações propriamente ditas
Avaliação Qualitativa dos Riscos de Incêndio debaixo das Pontes	Kotsovinos <i>et al.</i> (2016)	O artigo apresenta um processo de avaliação dos perigos para a caracterização de uma ameaça a pontes com potenciais incêndios abaixo dela.	A avaliação de risco facilita a compreensão de quaisquer medidas para a mitigação que precisa ser imposta pelos operadores da região abaixo da ponte. Também se estima a quantidade de proteção contra incêndio as estruturas podem necessitar.
Análise detalhada das causas de incêndios em pontes e seus níveis de danos associados	Peris-Sayol <i>et al.</i> (2015)	Revisão de dados e análise de mais de 150 cenários de incêndio em pontes	Observa-se na análise feita pelo autor que os incêndios em caminhões-tanque são o tipo de incêndio mais prejudiciais a uma ponte. Os incêndios de gasolina foram responsáveis pela maioria dos danos e seus volumes típicos de combustível giram no entorno de 30 - 35 metros cúbicos.

Título do Trabalho	Autor e Ano	Tópico de pesquisa	Sinopse
			conclusão
Avaliação Quantificada do Risco de Incêndio para o Projeto de Pontes Contra Incêndio	Flint <i>et al.</i> (2017)	Metodologia para caracterização de riscos de incêndio em pontes	Metodologia na avaliação de Risco quantificada como parte do processo de tomada de decisão para o projeto de pontes.

Fonte: Elaborado pelo autor com dados reunidos por Naser e Kodur (2015)

Segundo Gales, Nicoletta e Kotsovinos (2019) um dos métodos mais eficazes na redução dos riscos de incêndio em pontes pode ser observado quando há uma maior segurança nas estradas próximo desses ativos, o que pode reduzir o número de incêndios de veículos por colisões. Segundo Woodworth *et al* (2015) os maiores motivos para o colapso de pontes em ordem decrescente são:

- a) Eventos hidráulicos (tais como erosão, fluxo de detritos e inundações);
- b) Colisões;
- c) Sobrecarga;
- d) Deterioração;
- e) Incêndio;
- f) Terremotos.

Segundo Naser e Kodur (2015) a probabilidade de uma única ponte nos EUA sofrer um incêndio em um determinado ano é de 2,27% e a probabilidade do seu colapso induzido por incêndio no mesmo no mesmo ano é de 3,1%. Ainda segundo os autores, a probabilidade de ocorrer incêndio é de 29,5% e a probabilidade de ocorrer um colapso induzido pelo fogo é de 12,1%, quando a situação é atribuída para as edificações norte americanas.

Ainda segundo o autor a vulnerabilidade e a natureza crítica da ponte, é dada através do peso a cinco classes, consideradas brevemente na tabela a seguir, onde a ponte mais criticamente vulnerável terá uma pontuação ponderada (Quadro 10).

Quadro 10 – Parâmetros para classificação ponderada na avaliação de risco de incêndio em Pontes e Viaduto com atribuição de diferentes pesos

Item	Classe	Parâmetro	Peso
1	Geometria, Materiais e Características de projeto	Sistema estrutural, materiais e componentes, pistas e condição atual da Ponte ou Viaduto	47%
2	Probabilidade de risco de incêndio	Poder de resposta do corpo de bombeiros, relevância histórica ou arquitetônica da estrutura e potencial cenário de fogo	22%
3	Impacto econômico	Proximidade de rotas alternativas, tempo de reparo previsto e custo de reparo previsto	12%
4	Demandas de Tráfego	Média diária de tráfego e localização	11%
5	Perdas esperadas devido a incêndio	Vida potencial e perda de propriedade e dano ambiental	8%

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Naser e Kodur 2015.

Verifica-se, porém, que embora no cenário internacional se tenha um maior conteúdo, o comportamento ao fogo dos elementos estruturais de pontes de concreto é um assunto ainda relativamente pouco pesquisado em função das boas características de resistência ao fogo e não combustibilidade do concreto.

Identifica-se que a literatura relevante sobre as consequências de pontes de concreto expostos ao fogo (Quadro 11), são:

Quadro 11 - Literatura que aborda a ação excepcional do fogo nas estruturas de pontes e viadutos

Título do Trabalho	Autor e Ano	Tópico de pesquisa	Sinopse
Continua			
Deflexão para vigas de protendidas sob ação de cargas de vários vãos expostos ao fogo	Zhang et al. (2012)	Modelagem numérica de uma ponte em caixão de concreto protendido de quatro vãos exposta ao fogo em diversas regiões	A resposta geral à deflexão da ponte é apresentada para cada região de aquecimento considerada.
Avaliação de danos de uma ponte de concreto protendido após o incêndio	Xiang et al. (2013)	Avaliação de danos em uma ponte de concreto protendido exposta a um incêndio veicular	Avaliação de danos pós-fogo baseados em observação para determinar danos em concreto. Apresenta-se uma estimativa da capacidade residual da ponte.

Título do Trabalho	Autor e Ano	Tópico de pesquisa	Sinopse
			Conclusão
Avaliação e reparo de uma ponte de concreto protendido danificada pelo fogo	De Melo et al. (2014)	Revisão da avaliação de danos e dos reparos na ponte de concreto protendido "Dean's Brook Viaduct"	No caso estudado não houve perda significativa nas tensões do cabo da ponte onde nas áreas onde permaneceu o recobrimento do concreto. Já nas bainhas expostas ao fogo, houveram algumas perdas de protensão localizada.
Orientações para pós incêndios no concreto protendido que alcançaram temperaturas críticas	Robertson e Gales (2016)	Apresentação de estudos experimentais de concreto protendido em situação de extrema temperatura	Ensaio de resistência residual do aço em várias faixas de alta temperatura apontam que as diretrizes convencionais para o aço de protensão podem não ser conservadora. Com isso, sugerem-se revisões.
Desempenho estrutural ao fogo da construção contemporânea de concreto protendido	Gales et al (2016)	Estudo experimental detalhado considerando o desempenho ao fogo de elementos de concreto protendido	Este projeto descreve procedimentos para testar concreto protendido em situação de incêndio. Verifica-se também os resultados de experimentos de incêndio estrutural e recomendações para projetistas.
Comportamento de vigas em caixão protendido em ponte de concreto sob condição de incêndio de curva hidrocarboneto	Zhang et al. (2017)	Modelagem no software ANSYS de uma viga caixão de concreto protendido exposta ao incêndio na curva de hidrocarbonetos	Os elementos da alma mostraram ter temperaturas muito semelhantes para todas as exposições ao fogo. A deflexão da viga é caracterizada em quatro estágios. As deflexões verticais diminuem após um certo grau de aquecimento devido as tensões de protensão que resistem à expansão térmica do concreto.

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Gales, Nicoletta e Kotsovinos (2019)

Segundo Gales, Nicoletta e Kotsovinos (2019) existem implicações para experimentação de incêndios em pontes em função dos altos custos financeiros e de segurança por parte das instituições.

Observa-se também que muitas não têm espaço suficiente para a implantação do equipamento de teste de incêndio e indução de carga necessário para testar os sistemas estruturais de pontes em uma escala significativa e confiável (escala real). Dessa forma, entende-se que assim haveriam ensaios com uma das exposições mais severas e realistas que uma ponte pode experimentar em sua vida útil, e que de maneira geral, há uma pouca experimentação com foco no desempenho ao fogo de elementos de pontes ou viadutos de concreto, mesmo em países mais desenvolvidos,

muitas pontes de concreto em serviço, com isso muitas destas são degradadas por serem acometidas pelo fogo. Com isso, há a necessidade de mais pesquisas específicas que podem examinar a vulnerabilidade de pontes antigas e em mau estado à exposição ao fogo, sugerindo reformas para reduzir o risco e danos pelo incêndio. Logo, há a necessidade de uma melhor orientação sobre como avaliar, inspecionar e reabilitar pontes de concreto sujeitas ao fogo e pós-fogo.

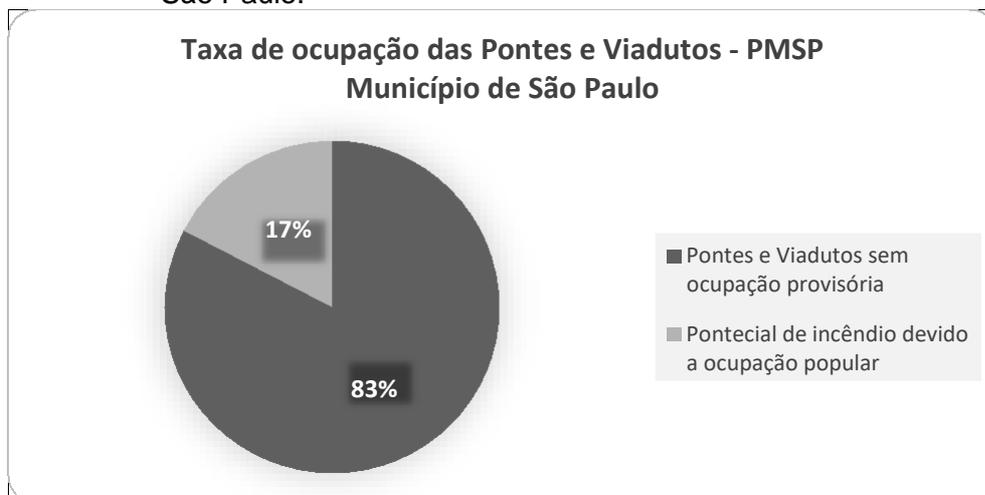
5.4 Incêndio em Pontes e Viadutos no Município de São Paulo

Cerca de 39 pontes e viadutos das 185 cadastradas pelo município de São Paulo, são ocupadas. Essa é uma informação baseada nas pontes e viadutos sob a administração da Prefeitura Municipal de São Paulo – PMSP, portanto, não se deve considerar ativos de concessão ou de cunho federativo, Sistema de Gerenciamento de Infraestrutura Urbana do Município, Pimentel (2019); Magalhães (2019) e RÁDIO E TELEVISÃO RECORD S.A (2019).

Corroborando com esse dado, Ippolito; Costa e Beltrame (2021), indicam que que 25% das Pontes e Viadutos no município de São Paulo desenvolvem dupla função, ou seja, uma atividade que pode estar atrelada ao suporte de tráfego de veículos e para a ocupação de academias poliesportivas, depósitos, estacionamentos e etc.

Levando em consideração esses dados, pode-se indicar uma taxa de ocupação de alta relevância, ou seja, um número alto que corresponde a um risco permanente de deteriorações pelo fogo em pontes e viadutos na região urbana do município de São Paulo (Figura 46).

Figura 46 - Taxa aproximada para ocupação de Pontes e Viadutos no Município de São Paulo.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Ippolito; Costa e Beltrame (2021)

A taxa de ocupação de pontes e viadutos existente na cidade de São Paulo está diretamente ligada não só ao risco de conflagração, mas também a riscos de deterioração devido a utilização do fogo rotineiro, que é feito por quem ali sobrevive.

Com base na mídia local e histórico recente, pode-se afirmar pelo menos 4 grandes conflagrações proveniente das ocupações por moradores em situação de rua, aconteceram nos últimos 10 anos no município de São Paulo, conforme dados apresentados no quadro 12.

Quadro 12 – Incêndios ocorridos em Pontes e Viadutos no Município de São Paulo devido a ação do fogo por ocupação da população em situação de rua.

Ano da Ocorrência	Denominação da Ponte e Viaduto	Material	Tempo aproximado de Interdição (h)
2019	Ponte do Jaguaré (Av. Jaguaré)	Concreto	96
2012	Viaduto Pompéia (Av. Pompeia)	Concreto	480
2019	Viaduto Bresser (Av. Alcântara Machado)	Concreto	144*
2012	Viaduto Engenheiro Orlando Murgel (Av. Rudge)	Concreto	48*

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Pimentel (2019); Magalhães (2019); Ippolito, Costa e Beltrame (2021)

Os problemas gerados pelas grandes conflagrações são vários. Sobretudo os custos imediatos e ocultos devidos a interdição, são os que mais afetam, principalmente quando se tratam de grandes centros urbanos como é o caso do Município de São Paulo.

Em contrapartida, os problemas pontuais, que não geram bloqueios e repercussão midiática, afetam diretamente a durabilidade, pois estão ligados à permanente e silenciosa deterioração da estrutura. Nota-se, inclusive também que a manutenção periódica ou corretiva tem tratado essas estruturas de forma que concepção de uso é feita apenas para o tráfego, desconsiderando que ali vivem pessoas que vão operar o fogo em seu interior e antecipar, ou até mesmo agravar a necessidade de correção de anomalias que ali se instauram devido a ação do fogo.

Em coleta de dados para a dissertação nas avenidas de São Paulo, verificou-se através de pontos escolhidos aleatoriamente em concreto, que é usual a presença de famílias em moradias provisórias, e também as consequências nos elementos construtivos da operação pontual do fogo (Figura 47).

Figura 47 – Elevada deterioração em laje em balanço acometida pela ação do fogo no Viaduto Min. Aliomar Baleeiro, bairro Saúde.



Fonte: Acervo pessoal

Verificou-se durante a coleta de dados, um maior dano pela ação do fogo nas proximidades do encontro, regiões mais baixas. Esses danos afetaram as almas externas, vigas transversinas e as lajes em balanço com a possibilidade pontual de exposição dos cabos ou bainhas de proteção. Na face inferior da laje em balanço observa-se a presença de concreto deslocado, fuligem e descoloração superficial do concreto (Figura 48).

Figura 48 - Detalhe da laje em balanço acometida pela ação do fogo no Viaduto Min. Aliomar Baleeiro



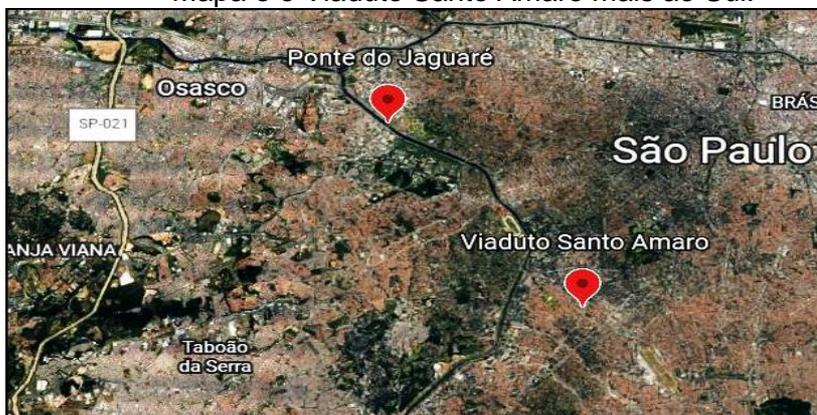
Fonte: Acervo pessoal

A aproximação da foto permite identificar um nível avançado de deslocamento do concreto, sujeitando a estrutura parcialmente a evolução de danos na armadura ativa e passiva. Outro grande problema é a presença de reforços em fibras de carbono não protegidos nas Pontes e Viadutos da capital. Nesse caso, pode-se observar Reforço de PRFC do Viaduto Santo Amaro, deteriorado pelo calor do incêndio de 2016.

5.4.1 Acidentes Estruturais: Incêndio no Viaduto Santo Amaro e Ponte do Jaguaré

No município de São Paulo, dois grandes incêndios em Pontes e Viadutos, de origem distintas, tornaram-se referência devido aos seus impactos no cotidiano da Cidade. As Pontes e Viadutos, Viaduto Santo Amaro ano 2016 e a Ponte do Jaguaré ano 2019, estão relativamente próximas fazendo parte do trajeto daqueles que trafegam diariamente entre a Zona Oeste do Município e também da Zona Sul e ABC paulista (Figura 49).

Figura 49 – Localização das Pontes e Viadutos atingidos pela ação do Fogo. Ponte do Jaguaré posicionada mais a Noroeste do Mapa e o Viaduto Santo Amaro mais ao Sul.



Fonte: Google Earth (2022)

5.4.1.1 Incêndio no Viaduto Santo Amaro

No dia 13 de fevereiro de 2016, o Viaduto Santo Amaro sofreu um incêndio considerado de alta severidade, dado em função da colisão entre um caminhão carregado com combustível inflamável e outro caminhão com carregamento açúcar. Optou-se inicialmente, ante uma detalhada inspeção e análise, a demolição total da estrutura, Faria e Ribeiro (2016).

Em contrapartida, após a realização de uma inspeção detalhada auxiliada por rigorosos ensaios, identificou-se a possibilidade de reabilitação da Estrutura. Logo, optou-se também por seu enquadramento nas normas mais atuais em relação ao projeto original, contemplando-se para as normativas mais atuais. A estrutura é composta por duas unidades estruturais UE's, visualmente idênticas, com cinco vãos, as fundações são compostas por tubulões e estacas, a mesoestrutura é formada por pilares maciços e a superestrutura por vigas de seção celular, usualmente conhecida como caixão perdido (Quadro 13).

Quadro 13 – Composição do Viaduto Santo Amaro

Viaduto Santo Amaro – 2 unidades Estruturais – UE's		
Elemento	Tipo	Vãos
1. Fundação	Concreto	- 5 vãos - 30m comprimento - 22m largura (Somatório das 2 UE's)
2. Mesoestrutura	Concreto Armado de Armadura Passiva	
3. Aparelho de Apoio	Neoprene Fretado no topo dos Pilares	
4. Superestrutura	Concreto Armado de Armadura Ativa e Passiva	

Fonte: Faria e Ribeiro (2016).

Verificou-se que apesar da semelhança existente nas UE's, as armaduras de protensão partem de tecnologias distintas, apresentando-se em cabos de fios e de cabos de cordoalhas, mais antiga e mais nova respectivamente, Faria e Ribeiro (2016). Os principais danos pela ação do fogo foram verificados na superestrutura do vão três, local abaixo de onde houve o choque entre os caminhões (Figura 50).

Nesse caso, por impossibilidade de verificação detalhada da condição pós-incêndio da armadura ativa, optou-se por desconsiderá-la no cálculo feito para a retroanálise da estrutura.

Figura 50 – Observa-se a condição encontrada no vão três. A esquerda, verifica-se a armadura ativa exposta e na direita observam-se pontos da retirada de testemunhos de concreto para ensaios.



Fonte: Faria e Ribeiro (2016).

Na ocasião foram realizados ensaios para identificar com precisão as condições residuais da estrutura. A partir deste diagnóstico da estrutura, obteve-se um encaminhamento assertivo, no sentido que o viaduto não fosse implodido, conforme cogitado inicialmente. Observa-se no quadro 14, os principais ensaios implementados na estrutura:

Quadro 14 – Ensaios e observações feitas pós-incêndio no Viaduto Santo Amaro

Ensaio	Parâmetro	Observação
1) Resistência a Compressão no Concreto	Projeto da estrutura: 30 MPa	Foram encontradas resistências de até 70 MPa
2) Limite de Escoamento, resistência, alongamento na ruptura e dobramento – Armadura de função Passiva	Aço CA 50 – (500 MPa)	Limite de escoamento: 442 MPa (Resultado mais baixo)
3) Armadura de Função Ativa	Projeto	Ensaios nas protensões não foram realizados devido à impossibilidade de acesso
4) Ensaios dinâmicos obtenção das frequências naturais de Vibração	Calculadas a partir de modelos numéricos	A ação do fogo não alterou significativamente a estrutura - as frequências naturais foram compatíveis com o modelo numérico

Fonte: Faria e Ribeiro (2016).

Neste vão, observou-se inclusive a perda total da fibra de carbono que havia sido implantada para reforçar a estrutura (Figura 51), deslocamento do concreto e a exposição das armaduras passivas e ativas.

Figura 51 – Condição visual da Face Inferior do Viaduto Santo Amaro onde o vão foi atingido pelo fogo



Fonte: Rede Globo de Televisão (2016).

Durante a reabilitação e reforço da estrutura verificou-se que também foram implantadas novas adequações, tais como:

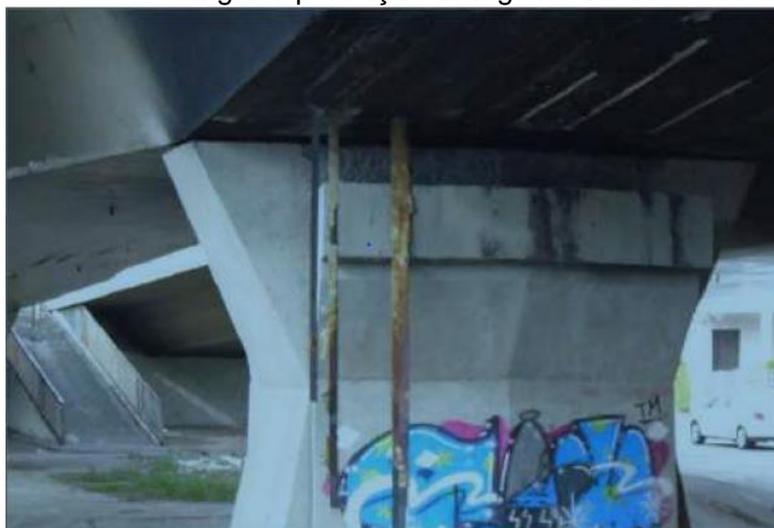
1) Adequação do trem tipo para Trem-Tipo rodoviário para a atual para TB-45, pois a estrutura foi projetada originalmente em meados dos anos 70, obtendo, portanto, um trem tipo inferior ao praticado na atualidade;

2) Adequação das barreiras de segurança, que na ocasião inicial colocavam os usuários numa condição de insegurança, para barreiras tipo “new-jersey” que são modelos estudados para função de conduzir os veículos desgovernados de volta para a pista;

3) Alargamento da pista permitindo um melhor formato para as três faixas de tráfego de cada viaduto, além de possibilitar um criar espaço para uma nova faixa de pedestres em uma das UE's;

Após as conclusões das obras, foram retomadas as atividades sem objeções do viaduto Santo Amaro, no caso em questão, foram necessários seis meses desde a data do acidente, contando com a execução das obras de reabilitação, adequação e reforço do Viaduto.

Figura 52 - Presença de reforços de fibras de carbono não protegidos atingidos pela ação do fogo no Viaduto Santo Amaro.



Fonte: Sollero; Santos e Tristão (2016)

5.4.1.2 Incêndio na Ponte do Jaguaré

No dia 21 de junho de 2019, a Ponte do Jaguaré sofreu ação de um incêndio considerado de média severidade, dado em função da conflagração em habitações de caráter provisório pré-existent abaixo da Ponte. Na ocasião, optou-se inicialmente pela interdição da passagem de veículos sobre a mesma. Vale ressaltar que a estrutura fazia parte de uma das 73 unidades cadastradas qual necessitavam de uma inspeção especial, ação qual indica a possibilidade de colapso ou não desse ativo, Bergamin e Bonini (2019) na figura 53 a seguir.

Figura 53 – Conflagração em habitações por parte da população em situação de rua atinge Ponte do Jaguaré em 2019



Fonte: Bergamin e Bonini (2019)

Na ocasião cerca de 50 famílias habitavam abaixo da estrutura, que pode corresponder a um total de até 150 pessoas vivendo ali. De maneira geral essas estruturas quando abrigadas por parte da população em situação de rua, estão sujeitas a dois tipos de eventos que envolvem a ação do fogo, no qual este autor chamaria de ação do fogo pontual e a ação generalizada.

A pontual ocorre de maneira imperceptível aos olhos da população, mas que afetam os elementos estruturais que compõem a estrutura, precisando assim de uma manutenção corretiva para que evite o desenvolvimento de outras anomalias. Já as generalizadas correspondem aos eventos nos cenários de conflagrações, geralmente noticiado em jornais locais, como foi o caso do incêndio supracitado. Verificou-se inclusive na Ponte do Jaguaré, também a presença de fuligem

partir de uma junta de dilatação defeituosa. Nesse caso (figura 54 e 55), a ação do fogo pode causar, inclusive, danos aos elementos que não estão diretamente acometidos pelas chamas

Figura 54 – Vista do Tabuleiro Superior durante o incêndio na Ponte do Jaguaré. Verifica-se o comportamento de uma junta de dilatação defeituosa mediante a ação do fogo.

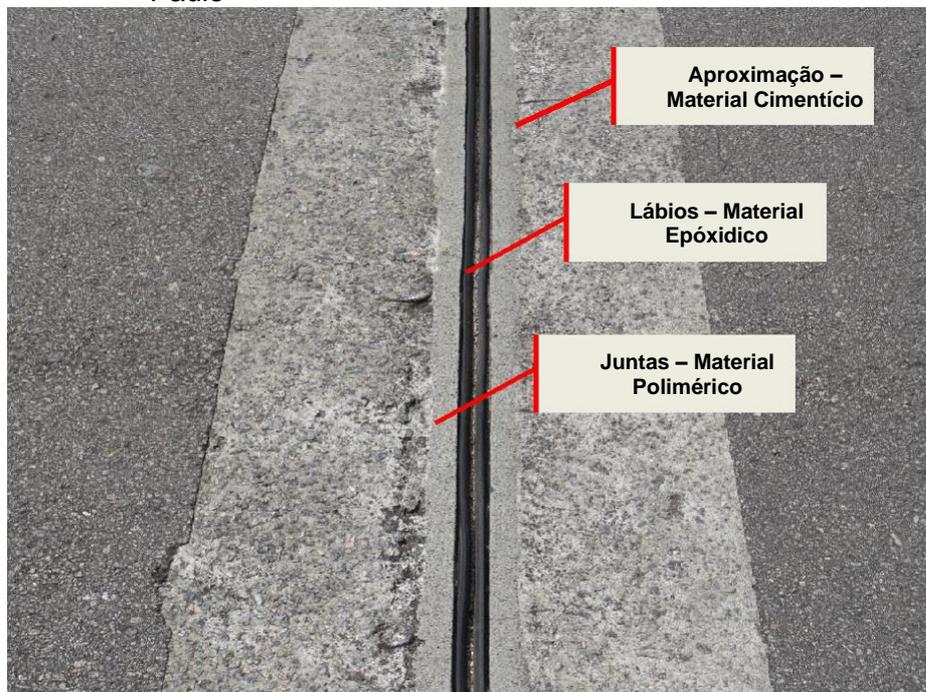


Fonte Bergamin e Bonini (2019)

Outra percepção obtida é que apesar da estrutura de concreto representar quase 100% do sistema estrutural, ainda existem materiais poliméricos e epóxicos como parte do sistema, tais como as juntas de dilatação, aparelhos de apoio etc (Figura 55 e 56).

Dessa forma a partir de determinadas temperaturas alcançadas, tem-se também estas partes com suas funcionalidades prejudicadas

Figura 55 – Configuração usual para juntas de dilatação em Pontes e Viadutos conforme verificados no Viaduto Antônio Abdo, Zona Leste de São Paulo



Fonte: Acervo pessoal

Em documento próprio feito sob o comportamento das altas temperaturas, tem-se que os materiais epóxi já sofrem deformações geométricas e perdas de capacidades mecânicas já em uma temperatura inferior a 100°C graus (Figura 54).

Os aparelhos de apoio em neoprene fretado, usualmente encontrados nas Pontes e Viadutos também possuem mal comportamento ao fogo (Figura 56).

Figura 56 – Vista de um aparelho de apoio – AA, em neoprene fretado atingido pela ação de um incêndio em um viaduto no Rodoanel - SP.



Fonte: Acervo pessoal

Verificou-se uma deformação excessiva e esmagamento devido a ação do fogo ter atingido o elemento e o fragilizado, estima-se que a temperatura tenha sido superior a 100 °C graus na região dos aparelhos de apoio - AA.

Quadro 15 – Comportamento ao Fogo de outros materiais aplicáveis para Pontes e Viadutos

Juntas de Dilatação e Aparelhos de apoio	
Tipo de Material	Temperatura admitida (°C)
Cimentícios	> 100°C graus
Epóxicido	< 100°C graus
Polímeros/Plástico	≤100°C graus

Fonte: Elaborado pelo autor com dados Lin (2020) e Bolina, Tutikian e Helene (2019).

Segundo a ABNT NBR 13860:1997 o incêndio corresponde ao fogo fora de controle que pode afetar os seres humanos e as estruturas. Com base nas ações generalizadas, qual tomam proporções dos meios de comunicação, também conhecido como as conflagrações. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997)

A Ponte do Jaguaré permaneceu totalmente interditada por quatro dias para o tráfego de veículos. Somente no dia 5 de julho, cerca de 10 dias após o incidente,

mediante a realização de monitoramentos e cálculos estruturais, foi liberada a circulação de ônibus simples (dois eixos) nos dois sentidos da Ponte do Jaguaré.

5.4.1.3 Outras Pontes e Viadutos acometidas pelo fogo no Município de São Paulo

Pontes e viadutos habitados por parte da população em situação de rua, estão sujeitas a dois tipos de eventos que envolvem a ação do fogo, no qual este autor chamaria de ação do fogo pontual e generalizada. A pontual ocorre de maneira imperceptível aos olhos da população, mas que afetam os elementos estruturais que compõem a estrutura, precisando assim de uma manutenção corretiva para que evite o desenvolvimento de outras anomalias (Figura 57). As generalizadas correspondem aos eventos nos cenários de conflagrações, geralmente noticiado em jornais locais.

Figura 57 – Viaduto Arapuã na Av. Bandeirantes sentido ABC Paulista. Observa-se a pintura executada sob o deslocamento explosivo do concreto pré-existente.



Fonte: Acervo pessoal

Percebe-se a na foto da esquerda a ocupação por moradores em situação de rua bem como no detalhe da foto à direita há a deterioração da face inferior da laje. As particularidades de deslocamento nesse caso, indicam ser provenientes da ação do fogo, provavelmente provocado por aqueles que ali habitam.

Percebe-se na foto a distinção das cores preto e rosa na superfície em um dos pilares de concreto (Figura 58 e 59).

Figura 58 - Diferentes pilares acometidos pelo Fogo em ação Pontual no Viaduto Governador Roberto Abreu Sodré, Região Central de São Paulo



Fonte: Acervo pessoal

As particularidades de coloração nesse caso, indicam ser provenientes da ação do fogo, deterioração provavelmente provocada pela operação dos que ali habitam.

Figura 59 - Diferentes pilares acometidos pelo Fogo em ação Pontual na Ponte Jurubatuba na Av. Interlagos, Zona Sul de São Paulo.



Fonte: Acervo pessoal

Segundo a Associação Brasileiro de Normas Técnicas (1997) a ABNT NBR 13860 o incêndio corresponde ao fogo fora de controle que pode afetar os seres

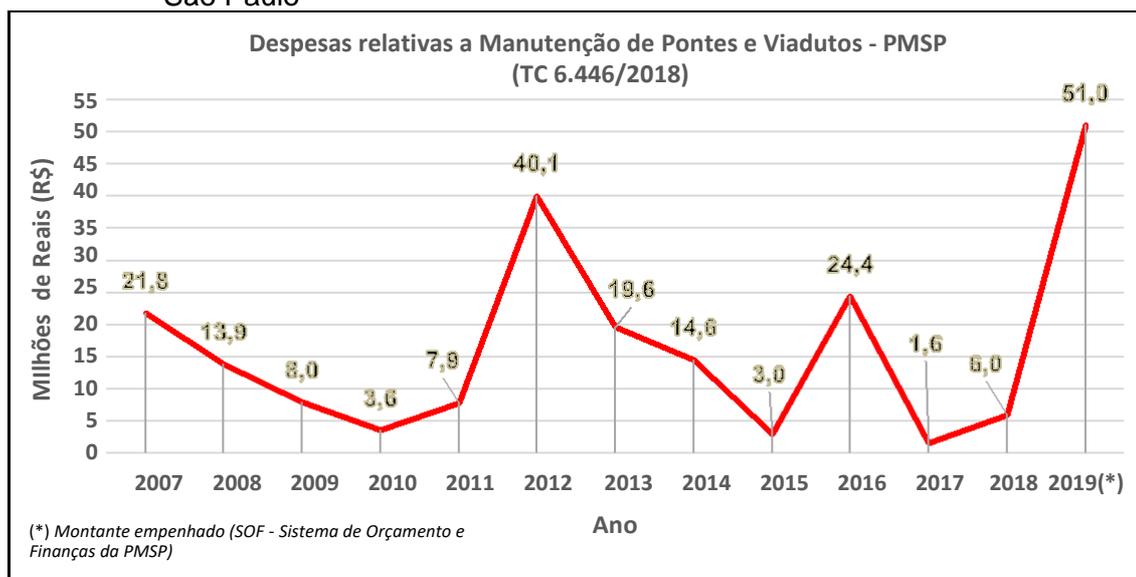
humanos e as estruturas.

Com base nas ações generalizadas, qual tomam proporções dos meios de comunicação, também conhecido como as conflagrações, como o que aconteceu em 2019 na Ponte do Jaguaré, Zona Oeste do município de São Paulo.

Nesse sentido, uma das principais finalidades da implantação de um sistema de gerenciamento de Pontes e dos Viadutos é uma maior garantia do correto funcionamento das estruturas a uma alocação monetária assertiva.

Dessa forma, verificou-se que só município de São Paulo, nos últimos 15 anos, acumularam-se despesas que totalizaram no entorno de 250 milhões de reais para a manutenção corretiva das Pontes e Viadutos, conforme apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 3 - Histórico de gastos com manutenção de Pontes e Viadutos no município de São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Dissei (2020)

Com dados de Magalhães (2019), Pimentel (2019) e Dissei (2020), das 185 Pontes e Viadutos cadastradas no gerenciamento pela prefeitura, em média, a prefeitura investe o equivalente a 16,58 milhões de reais, anualmente. Verifica-se também uma variação de 82% desse valor investido.

5.5 Avaliação de danos pelo incêndio: inspeção e ensaios realizáveis

Diante uma situação pós-incêndio, de maneira excepcional, faz-se necessário a realização de uma inspeção que tem como finalidade mensurar a extensão dos danos causados pela ação do fogo. Através deste aspecto, pode-se levantar quais foram os danos ocorridos. Estima-se que nesse caso excepcional, a inspeção deve ser feita de imediato, tendo em vista que alguns dados importantes desta ação podem desaparecer com o passar do tempo, sendo também potencializado devido a ação de remoção dos escombros e outras medidas tomadas por terceiros envolvidos na ação de combate ao incêndio e resgate de vítimas (Figura 60).

Figura 60 – Medidas de resfriamento de pilar de concreto armado após a ocorrência de incêndio de grandes proporções



Fonte: Timerman (2018)

Segundo Rodrigues e Oliveira (2021) a avaliação de danos em estruturas acometidas pelo fogo pode ser feita tanto de forma qualitativa, através de informações obtidas mediante inspeções, quanto de maneira quantitativa, fazendo-se necessário a realização de ensaios “*in loco*” combinados com ensaios laboratoriais por meio de extrações à fragmentos no local avaliado. Dessa forma, é possível determinar as características e propriedades residuais dos materiais que constituem a estrutura incendiada. Como diretriz, a avaliação deve começar a partir do entendimento do comportamento e desenvolvimento do fogo. Também é recomendado documentar o horário de chegada e a duração do combate ao incêndio pela equipe dos bombeiros,

assim como quais foram os meios e produtos utilizados na extinção do incêndio.

Ressalta-se que os corpos de bombeiros e uma situação excepcional produzem documentos de fundamental importância para uma melhor análise do fenômeno. Outros aspectos importantes da estrutura a serem considerados e avaliados são: a tipologia, uso, ocupação, materiais que compõe a estrutura e detritos dispostos nas mediações da ocorrência.

No Brasil, historicamente, existem algumas normas que estabelecem critérios quanto a realização de inspeções, bem como a aplicação de ensaios em pontes e viadutos de concreto. Observa-se que as principais documentações publicadas neste período foram:

- a) IP-DEC00/009: Inspeção de Obra de Arte Especial elaborado pelo DER-SP em 1996;
- b) ET021: Controle das condições estruturais, funcionais e de durabilidade de Obras de Arte Especiais editado pela ARTESP em 1999;
- c) PRO 020: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido publicado pelo DNIT em 2004.
- d) ABNT NBR 9452:2019 -- “Inspeção de Pontes, viadutos e passarelas de concreto”

Verifica-se o documento do Departamento Nacional de Infraestrutura De Transportes (2004), DNIT 010/2004-PRO – “Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento”, bem como a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas(2019a), ABNT NBR 9452 – “Inspeção de Pontes, viadutos e passarelas de concreto”, como as normas mais utilizadas no cotidiano. Quanto a realização de ensaios de campo e laboratoriais usualmente aplicados nas inspeções especiais para essas estruturas:

A pacometria (Figura 61) como método de ensaio, visa a localização e determinação do cobrimento das armaduras por indução magnética por meio de uma corrente induzida por bobinas. Pode-se utilizar normas que auxiliam .

Figura 61 – Detecção da posição e do cobrimento da armadura embutida no concreto



Fonte: Acervo pessoal

Verifica-se a retirada da camada de argamassa previamente existente ao concreto armado bem como a demarcação das armaduras verticais e horizontais existentes no elemento, bem como os seus cobrimentos.

Figura 62 –Ficha exemplo para registro de dados obtidos no ensaio de “pacometria” qual está definido o cobrimento mínimo de 6cm.

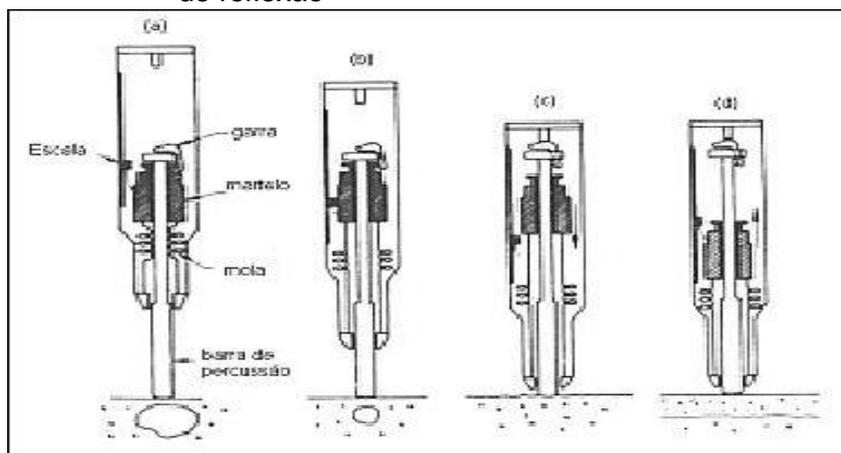
Localização	Elemento estrutural		Cobrimento (cm)							
	Tipo e nº	Face	1º	2º	3º	4º	5º	Média	Desvio padrão (s)	CV
Pilar	P1	OESTE	5,0	4,3	5,3	4,9	6,0	4,9	0,5	10%
			5,0	4,4	5,2	4,5	4,6			
Viga	V1	LESTE	5,5	5,4	5,8	6,0	6,2	5,8	0,3	5%
			5,9	6,0	5,6	5,4	5,8			
Laje	L1	SUL	4,4	4,4	4,1	3,9	-	4,2	0,3	7%
			4,7	3,9	4,3	3,8	3,9			

Fonte: Acervo pessoal

Observa-se que as normativas que podem auxiliar o ensaio são da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), ABNT NBR 6118 - projeto de estruturas de concreto – procedimento, bem como a norma Britânica - British Standards Institution(1988), BS 1881-204 – “*testing concrete - recommendations on the use of electromagnetic covermeters*”.

A esclerometria (Figura 63) permite avaliar a uniformidade do concreto endurecido por meio de avaliação da sua dureza superficial, fazendo-se uma correlação com resistência mecânica “residual”. O método mais comumente empregado é do esclerômetro de reflexão de Schmidt, que deve ser realizado conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012a), ABNT NBR 7584, Mehta e Monteiro (2006).

Figura 63 – Esquemático dos componentes e aplicação do esclerômetro de reflexão



Fonte: American Concrete Institute (1988)

Observa-se a existência de esclerômetros em caráter analógico (mais antigo) e digitais (mais moderno). Contudo, para obtenção do resultado final, ambos são correlacionados a uma curva padrão de índice esclerométrico.

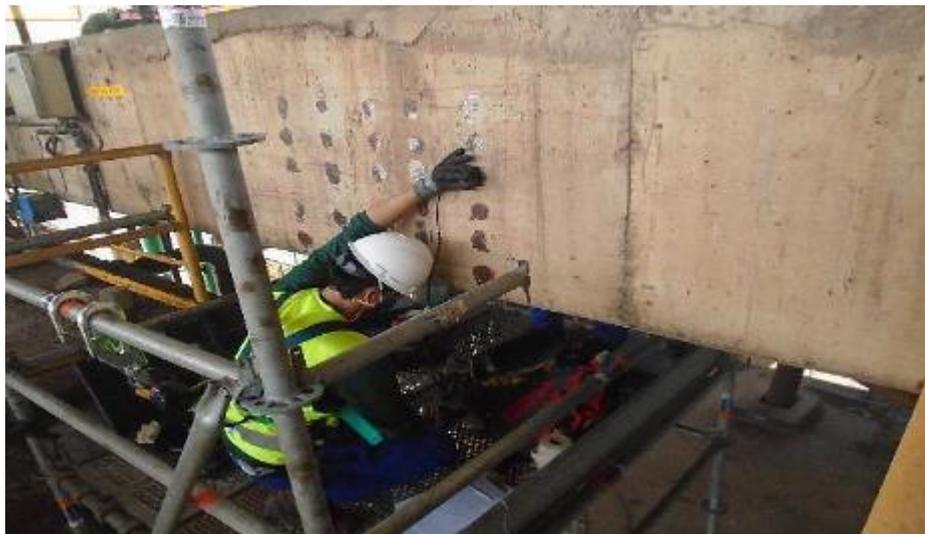
Figura 64 – Características do esclerômetro digital com painel de resultado final integrado.



Fonte: Thomaz (2021)

A detecção da propagação da onda ultrassônica (Figura 65) é método capaz de avaliar a qualidade do concreto, padronizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019b) ABNT NBR 8802. O ensaio permite obter informações aproximadas referentes ao módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão do concreto, localização de vazios, dentre outras deteriorações ou anomalias existentes no concreto, Sahuinco (2011).

Figura 65 – Realização do ensaio de ultrassom em viga de concreto armado através do método direto



Fonte: Acervo pessoal

Os parâmetros de avaliação correspondem a mensuração da velocidade em que as ondas sonoras levam a partir de um emissor e outro receptor.

Figura 66 – Correlação existente entre as velocidades captadas de propagação linear e a qualidade do concreto ensaiado

Velocidade de propagação linear (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4.500$	Excelente
$3.600 \leq V < 4.500$	Ótima
$3.000 \leq V < 3.600$	Boa
$2.100 \leq V < 3.000$	Regular
$V < 2.100$	Ruim

Fonte: Elaborado pelo autor com dados a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019b)

O ensaio de potencial elétrico (Figura 67) é o método de verificação entre a armadura e a superfície do concreto, de modo a estimar sua probabilidade de corrosão, conforme descrito pela American Society for Testing And Materials(1991) ASTM C876:1991. A diferença de potencial elétrico entre o aço e um eletrodo de referência em contato com a superfície do concreto define a suscetibilidade do elemento a corrosão (MAZER, 2012).

Figura 67 – Verificação no painel do resultado obtido no ensaio do potencial elétrico de corrosão em viga de concreto armado



Fonte: Acervo pessoal

Os parâmetros para avaliação do potencial elétrico de corrosão das armaduras são definidos pelo dado de Potencial Elétrico em mili-volts (mV) correlacionados a probabilidade de corrosão.

Figura 68 – Correlação existente entre o potencial e a probabilidade de corrosão

Potencial Elétrico (mV)	Probabilidade de Corrosão
Mais positivo que -200	Menor que 10%
Entre -200 e -350	Incerta
Mais negativo que -350	Maior que 90%

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de American Society for Testing and Materials (2015)

A resistividade superficial elétrica (Figura 69) – com a medida da resistividade elétrica, verifica-se maior predisposição para a oxidação nas armaduras (maior resistividade indicando menor potencial de corrosão). De acordo com Mazer (2012), os parâmetros foram tabelados pelo Comitê Europeu do Concreto - CEB, e podem ser realizados conforme especificações da ABNT NBR 9204:2012, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012b).

Figura 69 – Verificação do resultado obtido no dispositivo “resipod” determinando o valor de resistividade de 14.7 KΩ x cm



Fonte: Acervo pessoal

A resistividade elétrica é a propriedade do concreto que caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem da corrente elétrica. A medida da resistividade indica a habilidade relativa de um determinado meio em transportar correntes elétricas, havendo a possibilidade de correlaciona-se com a velocidade de corrosão (Figura 70) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2002).

Figura 70 – Representação da correlação existente entre o potencial e a probabilidade de corrosão

Resistividade (kΩ x cm)	Avaliação da Velocidade de Corrosão
Resistividade >20	Baixa
10 < Resistividade < 20	Baixa a Moderada
5 < Resistividade < 10	Alta
Resistividade < 5	Muito Alta

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de American Society For Testing and Materials (2015)

A determinação da espessura carbonatada do concreto (Figura 71), tem como objetivo determinar a profundidade da frente de carbonatação do concreto e o estado de passivação/despativação das armaduras.

Figura 71 – Aspersão da solução de fenolftaleína para verificação das espessuras máximas e mínimas de carbonatação do Concreto



Fonte: Acervo pessoal

Os parâmetros são a comparação da frente de carbonatação medida com a espessura de cobertura das armaduras, a partir da aspersão de solução de fenolftaleína.

Figura 72 – Ficha exemplo para coleta de dados referente ao ensaio de carbonatação do concreto para uma estrutura de 40 anos de idade

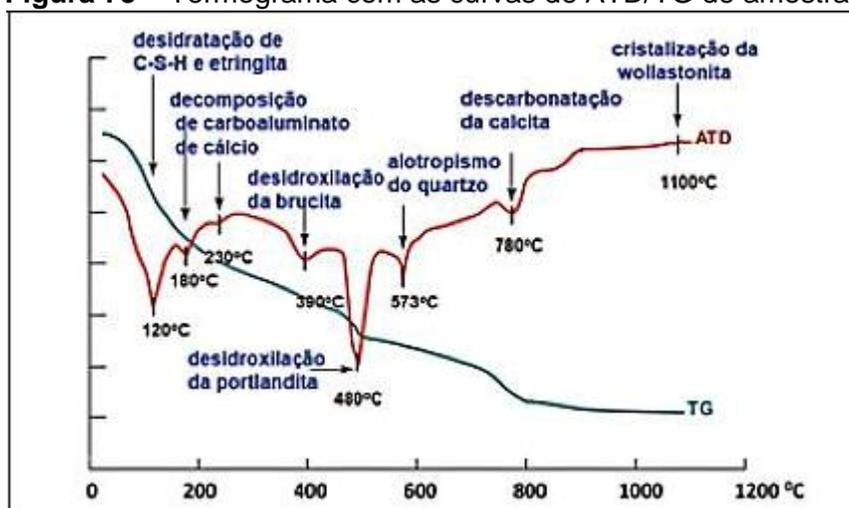
Ponto	Localização	Elemento estrutural		Cobrimento (cm)	Espessura carbonatada máxima (cm)	Período em trabalho (anos)	Coeficiente de carbonatação k (mm/ano ^{1/2})
		Tipo e nº	Face				
1	Pilar	P1	SUL	4,2	2,3	40	3,6
2	Viga	V1	SUL	3,4	1,1	40	1,7

Fonte: Elaborado pelo autor

Tem-se como referência para o ensaio a Norma Britânica BS EN 14630 – “products and systems for the protection and repair of concrete structures - test methods - determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method”. (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2006)

Análises Termodiferencial e Termogravimétrica (ATD/ATG) (Figura 73) são métodos que permitem identificar defeitos no concreto, consistem no emprego de elementos atômicos e, portanto, custo elevado e necessidade de cuidados adicionais de proteção à radiação. (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2006).

Figura 73 – Termograma com as curvas de ATD/TG de amostra de concreto

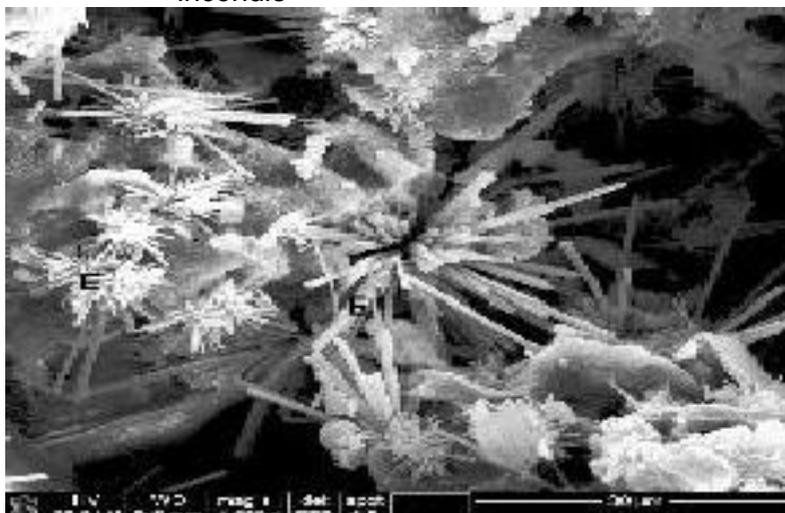


Fonte: Battagin e Silveira (2018)

Com base na figura 73, observam-se curvas de termograma clássico de uma amostra de concreto endurecido, mostrando seu comportamento com aumento da temperatura, isto é, as reações de desidratação e decomposição das fases da pasta hidratada (ATD) e as perdas de massa associadas a essas reações (TG). Uma amostra de concreto não é afetada de maneira homogênea sob as condições de incêndio, sendo verificado que a superfície da estrutura com face voltada ao fogo é a mais atingida e, a depender das condições, tempo e temperatura do incêndio, os danos no interior são menores ou mesmo insignificantes do ponto de vista da microestrutura. Por isso, a metodologia de análise consiste na amostragem a partir de diversas profundidades em relação à superfície, Battagin e Silveira (2018).

A Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV (Figura 74), conduz ao reconhecimento das feições microestruturais e especialmente a distribuição e morfologia das fases, presença de fissuras, avaliação da compacidade e segregações. Quando acoplada com *Energy Dispersive Spectroscopy* -EDS a MEV permite identificar a composição química, apontando elementos químicos na área na qual se encontra o composto mineralógico, tornando possível seu diagnóstico.

Figura 74 – Porção interna de amostra de concreto em relação a face exposta ao fogo, observada em MEV, onde a presença de cristais aciculares de etringita indica que amostra não superou 100 °C durante o incêndio



Fonte: Battagin e Silveira (2018)

Assim, ao se reconhecer por MEV, numa amostra de concreto, a presença de cristais aciculares de etringita, isso significa que amostra não superou 100°C , pois a etringita ficaria amorfa acima dessa temperatura, e a ausência de microfissuração é também um fator indicativo de que não se ultrapassou esse patamar de temperatura. Os ensaios da microestrutura do concreto possibilitam a identificação da extensão dos danos causados por incêndio ao concreto, particularizando regiões e espessuras de cada elemento estrutural, permitindo avaliar as partes de uma estrutura que devam ser recuperadas e facilitando a escolha das medidas corretivas necessárias em cada caso, além de identificar elementos estruturais que devam ser substituídos. As técnicas apresentadas e a correta interpretação dos resultados obtidos podem auxiliar na tomada de decisões para o desenvolvimento de projetos de recuperação que considerem o estado real da estrutura e, portanto, favoreçam uma análise com base em segurança e economia, Battagin e Silveira (2018).

A caracterização das armaduras visa mensurar os impactos sofridos diante uma ação excepcional, como no caso da ação do fogo (Figura 75). Portanto, trata-se de uma investigação com maior nível de complexidade, pois geralmente é feita quando há algum tipo de colapso parcial ou total. Nesse caso, observa-se a necessidade de se avaliar a tipologia do aço empregado, composição química do aço, determinação da resistência a tração e alongamento e sua Metalografia.

Figura 75 – Trechos de laje em balanço e pilar recolhidos dos escombros do Edifício Wilton Paes de Almeida para ensaios.



Fonte: Helene, Couto e Pacheco (2019)

A exemplo da investigação do aço feita sob o colapso do edifício Wilton Paes de Almeida -WPA, obtiveram-se os seguintes parâmetros.

Quadro 16 – Caracterização da armadura acometida pelo fogo no pós-incêndio do edifício Wilton Paes de Almeida – SP.

Parâmetros	Caracterização
Tipologia do aço	Entalhado e Liso
Tipologia das bitolas do aço	8, 10, 16, 20 e 22mm
Composição química	C=0,29; Mn=0,91; Si = 0,41; P = 0,14; S = 0,07 e $C_{eq} = 0,47$ (máx. 0,38, 1,56, 0,55, 0,058, 0,058 e 0,59, respectivamente)
Tração	$F_{st} = 470$ a 760 MPa $F_{yk} = 320$ a 640 MPa
Alongamento	3 a 35%
Tipo de Ruptura	Dúctil
Classes	C60 e CA37

Fonte: Helene, Couto e Pacheco (2019)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando as permanentes mudanças culturais da nossa sociedade, bem como mudanças climáticas e o crescimento populacional, observa-se uma real necessidade de se ter como tema central uma correta identificação dos riscos e as principais consequências da ação do fogo nas Pontes e Viadutos.

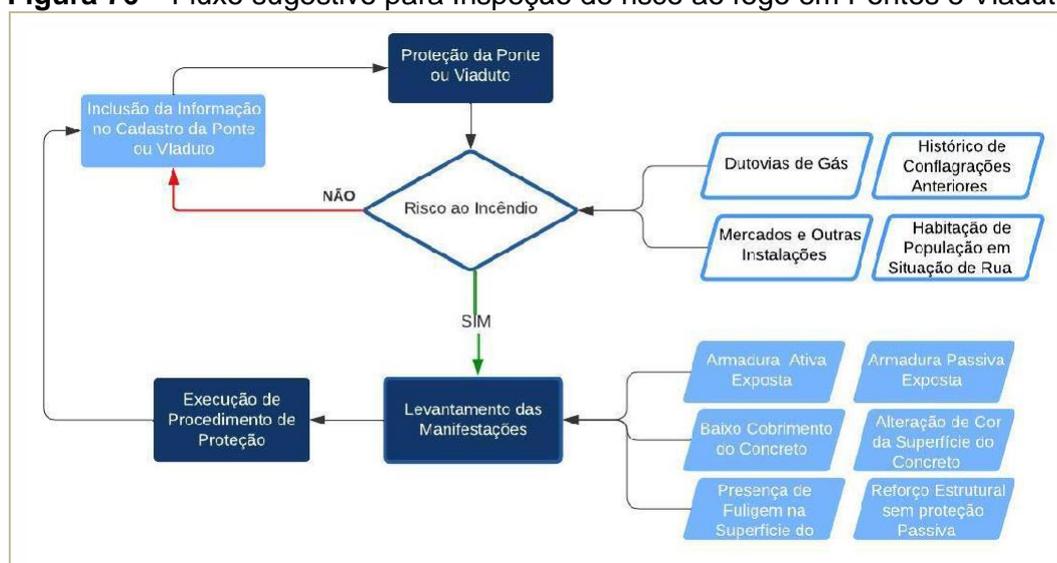
Tratando-se de um assunto pouco debatido ainda no cenário nacional, mas que tem se tornado cada vez mais importante, principalmente, para os grandes centros urbanos. Verifica-se a possibilidade de se elencar novas premissas, que vão facilitar e promover adaptações no campo da execução, classificação de risco, em como na manutenção propriamente dita desses importantes ativos do nosso cotidiano.

6.1 Conclusões Propriamente ditas

O presente estudo forneceu uma revisão abrangente e essencial do estado da arte sobre o tema de incêndio em Pontes e Viadutos.

Preliminarmente foi possível elencar os principais mecanismos, gatilhos e implicações quando dada a ocorrência deste fenômeno para Pontes e Viadutos em concreto e aço. Torna-se possível, através desta revisão, elencar um fluxograma para inspeção e gestão desses ativos, conforme apresentado na figura (76):

Figura 76 – Fluxo sugestivo para Inspeção de risco ao fogo em Pontes e Viadutos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Inclui-se ainda alguns dos principais acontecimentos dentro da perspectiva de autores no cenário nacional e no exterior, através de estudo de caso de acontecimento reais de maneira descritiva e ilustrada. Exemplifica-se ainda, como essas ações excepcionais foram contornadas para qual estes ativos pudessem retomar de maneira segura a sua utilização pós-incêndio.

Verifica-se através dos dados apresentados por Magalhães (2019), Pimentel (2019) e Dissei (2020), que o investimento anual para gerenciamento de Pontes e Viadutos no Município de São Paulo equivale a uma média de 16,58 milhões de reais, para 185 Pontes e Viadutos, havendo uma variação significativa nesse custo.

Dentre algumas incursões sobre tema, apresenta-se como pode-se realizar uma caracterização e quais são as principais consequências do efeito do fogo no aço e no concreto. Nesse sentido, pode-se também considerar a inclusão de outros materiais alternativos, possíveis de se encontrar em uma Ponte ou Viaduto.

Portanto, pode-se afirmar que estes dados são de fundamental importância para a utilização de profissionais, pesquisadores e também gestores que buscam tratar desses importantes ativos frente a vulnerabilidade e acometimento pela ação fogo.

Considerando a vulnerabilidade ao fogo das Pontes e Viadutos, com foco na sua proteção e sua durabilidade estrutural, apresenta-se uma matriz de decisão, elencando-se notas para diferentes tipos de critérios (Quadro 17):

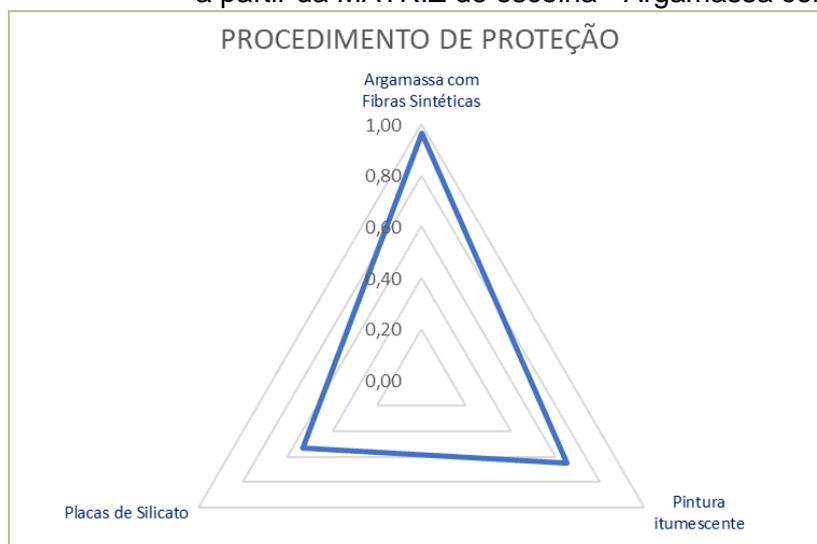
Quadro 17 – Matriz de Decisão para escolha do sistema de proteção das estruturas de concreto em Pontes e Viadutos sujeitas a ação Fogo.

Grupo de critérios	Critérios	Pesos	Procedimentos de Proteção		
			Argamassa com Fibras Sintéticas	Pintura intumescente	Placas de Silicato
Critérios técnicos	Estético	0,2	0,2	0,2	0,1
	Estético após ação do Fogo	0,2	0,2	0,1	0,15
	Reação ao Fogo	0,2	0,2	0,2	0,2
	Resistência ao Fogo	0,2	0,2	0,2	0,2
	Vida útil de Referência	0,2	0,2	0,1	0,15
	Média Ponderada	1	1	0,8	0,8
Critérios de custo	Baixo Custo de Produto e Disponibilidade	0,3	0,3	0,15	0,2
	Baixo Custo da Mão de Obra	0,3	0,2	0,2	0,2
	Baixo Custo de Manutenção	0,4	0,4	0,2	0,1
	Média Ponderada	1	0,9	0,55	0,5
Critérios de Risco	Confiabilidade na implantação Sistema	0,3	0,3	0,2	0,1
	Confiabilidade durante a situação de incêndio	0,4	0,4	0,2	0,1
	Resistência ao Vandalismo	0,3	0,3	0,2	0,1
	Média Ponderada	1	1	0,6	0,3
Soma		3	2,9	1,95	1,6
Média Aritmética da soma das Médias Ponderadas			0,97	0,65	0,53

Fonte: Elaborado pelo Autor

Entende-se, portanto, que a aplicação de uma camada de sacrifício com argamassa dotada de fibras sintéticas é método de proteção que apresenta uma maior nota, sendo o sistema que traz o melhor benefício para estrutura, considerando o cenário e os critérios supracitados.

Figura 77 – Pirâmide apresentando o mais recomendado procedimento de proteção a partir da MATRIZ de escolha - Argamassa com Fibras Sintéticas



Fonte: Elaborado pelo Autor

A argamassa com fibras sintéticas pode ser encontrada de maneiras distintas. Sendo comprada a própria fibra e adicionado a argamassa, sobretudo este tipo de mistura requer a necessidade de controle tecnológico prévio e comprovação da sua eficácia frente a ação do fogo. Quando é industrializada deve apresentar o benefício de ser certificado e controlado pela indústria, no que tange este último modo, observa-se uma maior confiabilidade para essa aplicação e segurança ao fogo da estrutura.

6.2 Transferência do Conhecimento

Transferiu-se o conhecimento desenvolvido durante a elaboração deste trabalho tanto para sociedade comum, quanto o meio técnico e acadêmico, através da apresentação do tema e partes do conteúdo dessa dissertação na Semana de Engenharia da Mackenzie em 2022; Webinar promovido pelo IPT em 2021 pela Coordenação do Mestrado; Artigo Técnico Publicado no Anais do Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas – CBPE, em 2021; participação do Autor nas reuniões na ABNT/CEE-169 - Execução e Inspeção de Estruturas Especiais de Concreto, Mistas, de Alvenaria e de Pedra, 2021 até o presente momento desta dissertação.

6.3 Sugestões a Pesquisas futuras

Mediante o caráter multidisciplinar do tema, verifica-se que embora se avalie o comportamento ao fogo de Pontes ou Viadutos de concreto e aço, há também a necessidade de entender materiais alternativos, tais como a madeira, epóxi, poliuretano, combinadas ou não a um grau de deterioração pré-existente, uma vez que usualmente Pontes e Viadutos são reabilitados ou reforçados através destes materiais.

No que tange a área de inspeção, avaliação de danos e recomendações de terapia do concreto de Pontes e Viadutos, verifica-se a possibilidade de aprofundamento de entendimento e avaliação da sua durabilidade a partir da exposição do concreto a sais hidrosolúveis e cloretos provenientes da fumaça na queima de materiais de base polimérica, tais como garrafas pets, pvc ou pead durante um fenômeno ou queima pontual fogo nas mediações dessas estruturas; pode-se traçar um nível de contaminação e as consequências que esses gases corrosivos trazem para a durabilidade das Pontes e Viadutos constantemente afetadas nesse sentido.

Estudar as características e comportamento dos deslocamentos explosivos “spalling” a partir do cenário de incêndio em Pontes e Viadutos, bem como correlacionar-se as características do concreto que foi submetido aquela situação;

Estudar o comportamento e qual seria a espessura média mais recomendada para um adequado medida de encamisamento, ou promoção de camada de sacrifício para se utilizar de maneira preventiva em Pontes e Viadutos com elevado risco de incêndio.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **28 – 1R – 89**. In place methods for determination of strength of concrete., Detroit: ACI, 26 pp, 1988.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876:2015**. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. EUA: ASTM, 2015. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four electrode method – G 57:95a (reapproved 2001). **ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARD**, v. 3.2., p. 225-229, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13860:1997** . Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14432:2001**. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5627:2001**. Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7584:2012**. Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8660:2013**. Ensaio de reação ao fogo em pisos – Determinação do comportamento com relação à queima utilizando uma fonte de calor radiante. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9204:2012**. Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrica-volumétrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 9452:2019**. Inspeções de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a. 48p. a

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT/CB-024 –** Sistemas de detecção e alarma de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802:2019** . Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200:2020**. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.48p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014**. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 31000:2009**. Gestão de riscos — Princípios e diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 32 p

BATTAGIN, Arnaldo Forti; SILVEIRA, Ana Livia Zeitune de P. Estudo da microestrutura do concreto em situação de incêndio: um termômetro da temperatura alcançada. **Concreto e Construção**: Segurança das estruturas, São Paulo: IBRACON, v. 89, p. 1-96, mar. 2018.

BERGAMIN, Giba; BONINI, Victor. **Incêndio atinge Ponte do Jaguaré na Zona Oeste de São Paulo**. São Paulo: G1 - Rede de Televisão Globo. Jun. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/06/21/incendio-atinge-ponte-do-jaguare-na-zona-oeste-de-sao-paulo.ghtml> Acesso em 29 maio 2022

BERTO, Antonio Fernando. **Abordagem sistêmica da segurança contra incêndio: do projeto ao uso dos edifícios**. São Paulo: IPT, 2020. (27 slides, color, 25x20).

BERTO, Antonio Fernando. **Medidas de proteção contra incêndio: aspectos fundamentais a serem considerados no projeto arquitetônico dos edifícios**. 1991. 351 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

BERTRAND, Alain. **Processos de Reforço de Obras de Arte Especiais com Ênfase em Protensão Externa**. 2018. 154 f. Dissertação (Mestrado Habitação: Planejamento e Tecnologia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: https://sapiens.ipt.br/Teses/2018_HAB_Alain_Bertrand.pdf. Acesso em: 22 maio 2022.

BOLINA, Fabrício Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Patologia de Estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320 p. Disponível em: <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/ofitexto.arquivos/patologia-de-estruturas-DEG.pdf> . Acesso em 24 maio 2022

BRITISH STANDARDS INSTITUTE. **BS ISO 1881-204:1988**. Testing Concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters. ACI 228.2R-21 Part 2: Nondestructive Test Methods for evaluation of Concrete in Structures. London, United Kingdom:BSI, 2004.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 14630:2006**. Products and systems for the protection and repair of concrete structures: test methods: determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. London, United Kingdom: BSI, 2006.

CASTELFRANCO, Sabina. **As Mediterranean Wildfires Rage, Italy Counts Environmental Losses**. Europa: Voanews, august, 2021. Disponível em: https://www.voanews.com/a/europe_mediterranean-wildfires-rage-italy-counts-environmental-losses/6209199.html. Acesso em: 22 maio 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Risco de Acidente de Origem Tecnológica**: método para decisão e termos de referência. Método para decisão e termos de referência. 2011. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4261-revisada.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2023.

COUTINHO, Joana de Sousa. **Agregados para Argamassas e Betões**. 1999. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 1999. Disponível em: <http://civil.fe.up.pt/>. Acesso em: 22 maio 2022.

DAVIES, J. W. **Map of Roman roads**. 2015. Disponível em: https://www.reddit.com/r/MapPorn/comments/jw3e0e/map_of_roman_roads. Acesso em: 28 maio 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma DNIT 010/2004 – PRO – Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento**. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.

DISSEI, Conselheiro Domingos. **Workshop**: planejamento e gestão da manutenção de obras de arte especiais. São Paulo: Escola Superior de Gestão e Contas Públicas - TCMSP, 2020. (12 slides, color, 25x20).

FARIA, Mauro de; RIBEIRO, Catão. Recuperação e reabilitação estrutural do Viaduto Santo Amaro. **Concreto e Construção**: soluções para recuperação de pontes, viadutos, edificações e fachadas, São Paulo, v. 82, n. 1, p. 40-48, abr. 2016.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. **Fire desing of concrete structures**: materials, and modelling structures. Switzerland: FIB, 2007. (FIB Bulletin 38

FERNANDES, Cláudio. **Grande incêndio de Roma**. Brasil Escola.([2021?]). Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/historiag/grande-incendio-roma.htm>. Acesso em 20 set.2021.

GALES, John; NICOLETTA, Benjamin; KOTSOVINOS, Panagiotis. Review of the Fire Risk, Hazard, and Thermo-Mechanical Response of Bridges in Fire. **Canadian Journal Of Civil Engineering**, v.44, n.2, p.1-44. jun. 2019.

GARLOCK, Maria; PAYA-ZAFORTEZA, Ignacio; KODUR, Venkatesh; GU, Li. Fire hazard in bridges: review, assessment and repair strategies. **Engineering Structures**, v. 35, p. 89-98, fev. 2012.

GOOGLE EARTH. Google. Ponte Jaguaré e Viaduto Santo Amaro, Município, São Paulo. jun.,2022. Disponível em <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/> Acesso em 30 maio 2022

REDE GLOBO DE TELEVISÃO. **Calor no Viaduto Santo Amaro atingiu até 600°C após explosão, diz laudo**. São Paulo: G1, 3 marc. 2016. Disponível em :<https://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2016/03/calor-no-viaduto-santo-amaro-atingiu-ate-600c-apos-explosao-diz-laudo.html>. Acesso em 30 maio 2022

HELENE, Paulo; BRITTEZ, Carlos; CARVALHO, M.. Ações e efeitos deletérios do fogo em estruturas de concreto. Uma breve revisão. **Revista Alconpat**, v. 10, n. 1, p. 1-21, dez. 2019. (DOI <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i1.421>).

HELENE, Paulo; COUTO, Douglas; PACHECO, Jessika. Colapso do Edifício Wilton Paes de Almeida – SP: lições aprendidas. **Revista Alconpat**, v. 10, n. 1, p. 114-131, dez. 2019. (DOI <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i1.419>).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Laboratório de Segurança ao Fogo e a Explosões - LSFEx**. São Paulo: IPT. Disponível em: http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CETAC/laboratorios_e_sessoes/36-laboratorio_de_seguranca_ao_fogo_e_a_explosoes___lsfex.htm. Acesso em: 22 maio 2022

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1182:2020. Reaction to fire tests for products — non-combustibility test. 2020**. 6 ed. Genebra, Suíça: ISO, 2020. 31 p. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/70178.html>. Acesso em: 22 maio 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11925-2:2020. Reaction to fire tests — ignitability of products subjected to direct impingement of flame — part 2: single-flame source test**. 4 ed. Genebra, Suíça: ISO, 2020. 27 p. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/71204.html>. Acesso em: 22 maio 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834:1975. fire-resistance tests — elements of building construction**. Genebra, Suíça: ISO, 1975. 16 p. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/5197.html>. Acesso em: 22 maio 2022.

IPPOLITO, Vinicius; COSTA, Carla Neves; BELTRAME, Alexandre. Pontes e viadutos na cidade de São Paulo em situação excepcional de incêndio. *In*: **CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 12**. 2021. (On-line). São Paulo: CBPE, 2021. p. 1-12. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352197563_Pontes_e_viadutos_na_cidade_de_Sao_Paulo_em_situacao_em_situacao_excepcional_de_incendio. Acesso em: 26 maio 2022.

KHOURY, Gabriel Alexander. Passive protection against fire. **Tunnels & Tunnelling International**, London, n. 34, p. 40-42, nov., 2002. (Technical Review – Fire Safety). Disponível em: https://prozask.ru/d/khoury-passive_protection_against_fire.pdf. Acesso em: 22 maio 2022.

KHOURY, Gabriel Alexander. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress In Structural Engineering And Materials**, v. 2, n. 4, p. 429-447, out. 2000. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pse.51>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/229901307_Effect_of_fire_on_concrete_and_concrete_structures. Acesso em: 28 maio 2022.

KODUR, V.K.R. Guidelines for fire resistance design of high-strength concrete columns. **Journal of Fire Protection Engineering**, v.15, n.2, p.93-106, 2005. (DOI <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1042391505047740>)

LEONE, Jared. **Fire at Austin homeless camp destroys several tents, damages bridge**. EUA: Cox Media Group National Content Desk, march, 2021. Disponível em: <https://www.boston25news.com/news/trending/fire-austin-homeless-camp-destroys-several-tents-damages-bridge/TRR2P4RACRGBJDXT2LX2TW6MDE/>. Acesso em: 22 maio 2022.

LIN, Rogério (Org.). **Curso de Proteção passiva contra incêndio: módulo i**. São Paulo: Associação Brasileira de Proteção Passiva, 2020. (75 slides, color, 25x20).

LONDON FIRE BRIGADE. **The Great Fire of London**. ([2021?]). Londres. Disponível em: <https://www.london-fire.gov.uk/museum/history-and-stories/the-great-fire-of-london/>. Acesso em: 20 set. 2021

MAGALHÃES, Beatriz. Cerca de 1.500 famílias vivem embaixo de pontes e viadutos em SP sob risco de incêndios: 'é um cantinho para ter dignidade'. **G1**. São Paulo, p. 1-4. set. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/09/17/cerca-de-1500-familias-vivem-embaixo-de-pontes-e-viadutos-em-sp-sob-risco-de-incendios-e-um-cantinho-para-ter-dignidade.ghtml>. Acesso em: 28 maio 2022

MARCHETTI, Osvaldemar. **Pontes de Concreto Armado**. 2.ed. São Paulo: Blucher, 2018. 246 pgs.

MAZER, Wellington. Inspeção e ensaios em estrutura de concreto. 2012. Disponível em: https://paginapessoal.utfpr.edu.br/login_form?came_from=http%253A//paginapessoal.utfpr.edu.br/wmazer/especializacao-em-patologia-das-construcoes/Notas_de_Aula_Ensaios.pdf/at_download/file Acesso em: 29 maio 2022

MCCORNICK, M. et al. **Roman roads network**. 2013. Disponível em: https://www.reddit.com/r/MapPorn/comments/jw3e0e/map_of_roman_roads. Acesso em: 28 maio 2022.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: microestrutura, properties and materials**. 3. ed. Berkeley: McGraw-Hill, 2006. 659 p.

MONTOYA, Rodolfo. **Manual de manutenção de Pontes Ferroviárias**. São Paulo: Pini, 2016. 134 p.

MONTFERRE, Helio (ed.). **População em situação de rua supera 281,4 mil pessoas no Brasil: estimativa divulgada pelo ipea aponta crescimento de 38% desse segmento, durante a pandemia de covid-19**. 2022. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/13457-populacao-em-situacao-de-rua-supera-281-4-mil-pessoas-no-brasil>. Acesso em: 20 jan. 2022.

MURATORI, Gabrielle Pontes. **Estudo e desenvolvimento de um sistema de gerenciamento aplicado às pontes rodoviárias**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2001. (7 slides, P&B, 25x20).

NASER, M. Z.; KODUR, Venkatesh R. VENKATESH R. A probabilistic assessment for classification of bridges against fire hazard. **FIRE SAFETY JOURNAL**., v.76, n.2, 65-73, 2015. (DOI: 10.1016/J.FIRESAF.2015.06.001)

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 502** – Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. Massachusetts-EUA: NFPA, 2014.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA. **Fire safety testing facility**. 2019.Canada: NRCC, 2019. Disponível em: <https://nrc.canada.ca/en/research-development/nrc-facilities/fire-safety-testing-facility>. Acesso em: 18 jan. 2022.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. **Highway Accident Brief: Fire damage to bridge and subsequent collapse**. Washington, EUA: NTSB/HAB, 2017. Disponível em: <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/HAB1802.pdf>. Acesso em: 22 maio 2022.

NICOLETTA, Benjamin; KOTSOVINOS, Panagiotis; GALES, John. Review of the fire risk, hazard, and thermomechanical response of bridges in fire. **Canadian Journal Of Civil Engineering**, Canada, v. 47, n. 4, p. 363-381, Apr. 2020.

PEREIRA, Bruna. **Como atuar com bons projetos de incêndio**. Paraná: Prev em Foco, 2020. (18 slides, color, 25x20).

PERIS-SAYOL, Guillem; PAYÁ-ZAFORTEZA, Ignacio. Bridge Fires Database. Alemanha: Researchgate, 2015. (https://www.researchgate.net/publication/317561066_Bridge_Fires_Database)

PIMENTEL, Guilherme. Levantamento aponta que 19 pontes e viadutos de SP estão há mais de 6 anos sem vistoria. **G1**. São Paulo, p. 1-4. jan. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/01/28/levantamento-aponta-que-19-pontes-e-viadutos-de-sp-estao-ha-mais-de-6-anos-sem-vistoria.ghtml>. Acesso em: 28 maio 2022.

RÁDIO E TELEVISÃO RECORD S.A. **Baixos de viadutos em SP têm lixo, barraco e até casas de alvenaria**. São Paulo: notícias r7, jun. 2019. Disponível em: <https://noticias.r7.com/sao-paulo/baixos-de-viadutos-em-sp-tem-lixo-barraco-e-ate-casas-de-alvenaria-25062019>. Acesso em: 22 maio 2022.

RISE RESEARCH INSTITUTES OF SWEDEN. **Fire resistance testing**. Sweden: RRI. Disponível em: <https://www.ri.se/en/what-we-do/services/fire-resistance-testing>. Acesso em: 22 maio 2022.

RODRIGUES, João Paulo Correia; OLIVEIRA, Rafael Luiz Galvão de. **Dimensionamento de estruturas em situação de incêndio segundo as Normas Brasileiras**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 188 p.

SAHUINCO, Melquiades Hermógenes Choquepuma. **UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS E SEMI- DESTRUTIVOS NA AVALIAÇÃO DE PONTES DE CONCRETO**. 2011. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-01112011-123905/pt-br.php>. Acesso em: 26 maio 2022.

SÃO PAULO (Capital). **Lei Nº 8.266, de 20 de Junho de 1975**: Aprova o código de edificações, e dá outras providências. São Paulo, 20 jun. 1975. Disponível em: <http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-8266-de-20-de-junho-de-1975>. Acesso em: 22 maio 2022.

SCABBIA, André (Org.). **Segurança contra incêndios: análise de riscos - Aula 01 TCE011 AS3**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2020. (26 slides, color, 25x20).

SEITO, Alexandre Itiu *et al.* **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Editora Projeto, 2008. 457p. (ISBN: 9766561295004)

SILVA, Patrícia C. *et al.* Ferramentas de gerenciamento para controle das obras de arte especiais do DNIT: SGO e Monalisa. **Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 12**. CBPE 7-11 jun. 2021. (online)

SILVA, Valdir Pignatta. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**: conforme ABNT NBR 15200:2012. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 237 p.

SOLLERO, M. B. S.; SANTOS, R. T.; TRISTÃO, G. A. Avaliação das condições estruturais do Viaduto Santo Amaro: Relatório n. RTS 9.1.8.006.0056-001/16. São Paulo: CONCREMAT ENGENHARIA E TECNOLOGIA S. A., 2016. 41 p. Disponível em: <https://bit.ly/2ylg4Yy>. Acesso em: 28 de março de 2021.

THOMAZ, Ércio. **Recuperação de Estruturas de Concreto Armado**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2021. (159 slides, color, 25x20)

TIMMERMAN, Julio. Apresentação e aplicação da norma brasileira de inspeção de pontes, viadutos e passarelas. **Concreto & Construções**. São Paulo, v. 91, p.29-35, jul-set. 2018. Disponível em: http://ibracon.org.br/site_revista/concreto_construcoes/pdfs/revista91.pdf . Acesso em 24 maio 2022

TIMMERMAN, Rafael. **Pontes e Viadutos em Situação de Incêndio**. São Paulo: Associação Brasileira de Proteção Passiva- ABPP, 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=b8-6AxkBnsg>. Acesso em: 22 maio 2022.

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS - Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil – ITT. **Performance Infraestrutura e laboratórios**: laboratório de segurança contra incêndio (LSCI). Laboratório de Segurança Contra Incêndio (LSCI). São Leopoldo – RS. . Disponível em: <https://www.unisinos.br/itt/performance/infraestrutura>. Acesso em: 22 maio 2022.

URZAIZ, Jorge Ley. **Programas de manutenção e contratação de serviços de manutenção de obras de arte especiais na Europa**. São Paulo: Escola Superior de Gestão e Contas Públicas - TCMSP, 2020.(20 slides, P&B, 25x20).

VALERIANO, Ricardo. **Pontes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 335 p.

WOODWORTH, M. *et al.* Protection of Cable-Stay Bridges from Accidental and Man-Made Fire Hazards: A Rational Physics-Based Approach to Analyzing Vulnerabilities and Mitigations. *In: STRUCTURES CONGRESS*, 2015. Portland, United States. **Proceedings [...]**. United States: ASCE, 2015, p. 24-37.

WU, Jinxiang et al.. Experimental research on gas fire backdraft phenomenon. **Procedia Environmental Sciences**, v. 11, part C, p. 1542-1549, jan. 2011. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.232>.)