

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

GREGÓRIO BECK DA SILVA GIANNAKOS

SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO:

**Estudo sobre sistemas de selagem perimetral para compartimentação vertical
em fachadas envidraçadas**

São Leopoldo

2023

GREGÓRIO BECK DA SILVA GIANNAKOS

SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO:

Estudo sobre sistemas de selagem para compartimentação vertical em fachadas envidraçadas

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

Coorientadora: Prof^a. Dra. Maria Fernanda de Oliveira

São Leopoldo

2023

G434s

Giannakos, Gregório Beck da Silva.

Segurança contra incêndio: estudo sobre sistemas de selagem perimetral para compartimentação vertical em fachadas envidraçadas / por Gregório Beck da Silva Giannakos. – São Leopoldo, 2023.

111 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Mauricio Mancio; Coorientação: Prof^a. Dr^a. Maria Fernanda de Oliveira, Escola Politécnica.

1.Construção civil. 2.Engenharia de incêndio.
3.Prevenção de incêndios. 4.Fachadas (Arquitetura).
5.Construção com vidro. 6.Edifícios – Medidas de segurança. I.Mancio, Mauricio. II.Oliveira, Maria Fernanda de. III.Título.

CDU 614.841.3

699.81

72.011.6:691.6

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

GREGÓRIO BECK DA SILVA GIANNAKOS

SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO:

Estudo sobre sistemas de selagem para compartimentação vertical em fachadas
envidraçadas

Dissertação apresentada como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil, pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

Coorientadora: Prof^a. Dra. Maria Fernanda de Oliveira

Aprovado em 23 / 02 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian – UNISINOS

Prof. Dr. Roberto Christ – UNISINOS

Prof. Dr. George Cajaty Barbosa Braga – CBMDF

RESUMO

A densificação dos centros urbanos, verticalização das edificações e a utilização de fachadas envidraçadas de forma cada vez mais recorrente coloca em pauta a segurança contra incêndio destas construções. Como as fachadas pele de vidro são compostas por elementos não resistentes ao fogo, isso a torna um sistema frágil e passível de comprometer a segurança global da edificação e dos usuários. A propagação pela fachada pode acontecer tanto internamente, pelo espaço formado entre a fachada e edificação, quanto externamente através do *leapfrogging*. Desta forma, a compartimentação deve ser levada em consideração mesmo em prédios com fachadas envidraçadas, com base nas instruções técnicas brasileiras, que passaram a adotar anteparos verticais de 1,20 metros em conjunto com sistemas de selagem corta fogo e/ou prolongamentos horizontais de 0,90 metros como medidas de proteção passivas. Diferentemente de outros países, o Brasil não possui norma técnica de ensaio específico para avaliar o sistema proposto pelas instruções técnicas, o que suscita questionamentos sobre a areal eficácia destes sistemas. O presente trabalho apresenta a avaliação de um sistema de compartimentação vertical conforme instrução técnica brasileira com base na metodologia de ensaio da ASTM E2307 (ASTM, 2020) e ASTM E2874 (ASTM, 2019), bem como discussão dos resultados com base no comportamento do fogo. Através dos resultados obtidos, constatou-se que a selagem perimetral foi capaz de resistir ao fogo até o momento da quebra do vidro junto a ela e, após a quebra, as temperaturas medidas ultrapassaram os limites normativos. O anteparo vertical de 1,20 metros se demonstrou eficaz ao evitar a entrada das chamas no pavimento superior, porém o fluxo de calor medido no topo do anteparo seria capaz de ignizar materiais comumente utilizados como revestimentos de salas comerciais. Assim, o sistema construtivo proposto pela instrução técnica se demonstrou eficiente até a quebra do vidro junto a selagem perimetral, demonstrando a importância de ter-se norma técnica brasileira apropriada para o desenvolvimento de sistemas específicos que garantam a compartimentação vertical nas fachadas envidraçadas.

Palavras-chave: Fachada envidraçada. Segurança contra incêndio. Compartimentação vertical. Selagem perimetral.

ABSTRACT

The densification of urban centers, the verticalization of buildings and the increasingly recurrent use of glazed facades puts fire safety in these buildings on debate. Since the glass facades are composed of non-fire resistant elements, it becomes a fragile system and liable to compromise the overall safety of the building and its users. Propagation through the facade can happen both internally, through the space formed between the facade and the building, and externally through leapfrogging. In this way, compartmentalization must be taken into account even in buildings with glazed facades, based on Brazilian technical instructions, which started to adopt 1,20 meter vertical bulkheads together with fireproof sealing systems and horizontal extensions of 0,90 meters as passive protective measures. Unlike other countries, Brazil does not have a specific technical test standard to evaluate the system proposed by the technical instructions, which raises questions about the areal effectiveness of these systems. The present work presents the evaluation of a vertical partitioning system according to Brazilian technical instruction based on the test methodology of ASTM E2307 (ASTM, 2020) and ASTM E2874 (ASTM, 2019), as well as a discussion of the results based on the behavior of fire. Based on the results obtained, it was found that the perimeter seal was able to resist fire until the moment the glass broke next to it and, after breaking, the measured temperatures exceeded the normative limits. The 1,20 meter vertical bulkhead proved to be effective in preventing flames from entering the upper floor, but the heat flux measured at the top of the bulkhead would be capable of igniting materials commonly used as coatings in commercial rooms. Thus, the constructive system proposed by the technical instruction proved to be efficient until the glass broke along with the perimeter sealing, demonstrating the importance of having an appropriate Brazilian technical standard for the development of specific systems that guarantee the vertical compartmentation in the glazed facades.

Keywords: Glazed facade. Fire safety. Vertical compartmentalization. Perimeter fire barrier.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sequência de categorias para classificação de fachadas envidraçadas..	20
Figura 2 – Elementos de uma fachada cortina	23
Figura 3 – Curva temperatura-tempo de um incêndio real e respectivos estágios....	30
Figura 4 – Sobreposição das curvas padronizadas mais utilizadas	31
Figura 5 – Compartimentação vertical em fachadas cortina	38
Figura 6 – Fatores que influenciam na propagação do fogo nas fachadas	39
Figura 7 – Principais causas de propagação dos incêndios em fachadas	40
Figura 8 – Efeito <i>leap frog</i>	41
Figura 9 – Ordem de importância dos fatores na quebra do vidro	42
Figura 10 – Trajetória das chamas em condições de fluxo natural (a) $h > 1,25w$ ou sem muro acima da janela; (b) $h < 1,25w$ com muro acima da janela; (c) vista em planta das chamas.....	43
Figura 11 – Trajetória da chama com diferentes formatos de janelas.....	43
Figura 12 – Perfil das chamas projetadas em janelas com (a) 1,5 metro de altura e (b) 2,0 metros de altura	44
Figura 13 – Desenvolvimento do fogo no modelo n° 1 do estudo de Schabowicz <i>et al.</i>	46
Figura 14 – Desenvolvimento do fogo para os modelos 7 e 9 do Quadro 6.....	47
Figura 15 – Diferentes posicionamentos dos sistemas de compartimentação vertical	48
Figura 16 – Resultados das simulações computacionais propostas	49
Figura 17 – Selagem perimetral e anteparo vertical (soluções 01, 02 e 03)	50
Figura 18 – Simulações computacionais das soluções 01, 02 e 03	50
Figura 19 – Tipos de fixação da fachada simulados na Solução 02.....	51
Figura 20 – Fluxo de ar quente e oxigênio na janela.....	52
Figura 21 – Exemplo de comportamento: (a) sem compartimentação vertical e (b) com compartimentação vertical.....	57
Figura 22 – Desprendimento da estrutura	57
Figura 23 – Estrutura de ensaio segundo ASTM E2307	61
Figura 24 – Posicionamento dos termopares.....	61
Figura 25 – Configurações de fachadas cortina para ensaio de resistência ao fogo	63

Figura 26 – Exemplo de configuração de ensaio de fachada cortina parcialmente resistente ao fogo com painel <i>spandrel</i> e selagem perimetral expostos ao fogo internamente e externamente.....	64
Figura 27 – (a) Parede de calibração e posicionamento dos termopares; (b) Posicionamento dos termopares na parte externa da parede	69
Figura 28 – Termopares posicionados na sala de testes	70
Figura 29 - Fachada pele de vidro e termopares ao longo da fachada	74
Figura 30 - Distribuição dos termopares na selagem perimetral (vista superior na sala de observação).....	75
Figura 31 - Temperaturas médias no intervalo de 0 a 5 minutos	86
Figura 32 - Desenvolvimento da temperatura no decorrer dos intervalos	89
Figura 33 - Temperaturas (°C) máximas de cada termopar durante o ensaio	95
Figura 34 – <i>Leapfrogging</i> durante os primeiros 5 minutos de ensaio.....	97
Figura 35 – <i>Leapfrogging</i> durante o ensaio após ignição do queimador externo	98

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Galerias de concreto armado	66
Fotografia 2 – Revestimento interno da sala de testes	67
Fotografia 3 – Distância dos furos do queimador a partir da parede de fundos	67
Fotografia 4 – Posicionamento dos termopares TP #19 ao TP #23	70
Fotografia 5 – Posicionamento dos sensores de fluxo de calor	71
Fotografia 6 – Anteparo vertical na sala de observação	76
Fotografia 7 – Intervalo de 5 a 10 minutos (a) leapfrogging; (b) registro fotográfico da ocorrência do leapfrogging durante a calibração.....	87
Fotografia 8 - Quebra dos vidros no decorrer dos minutos iniciais do ensaio	91
Fotografia 9 - Quebra dos vidros após ignição do queimador externo	91
Fotografia 10 – Vista superior da selagem perimetral aos (a) 5 minutos; (b) 40 minutos; (c) 45 minutos.....	95
Fotografia 11 – Fogo do queimador externo entrando na sala de testes	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de temperatura média e tolerâncias.....	73
Gráfico 2 - Temperatura média dos termopares posicionados próximos à janela (#16 ao #18) e dos termopares posicionados centralizados (#19 ao #23).....	79
Gráfico 3 - Temperatura média dos termopares #19 ao #23.....	79
Gráfico 4 - Temperatura média dos termopares #16 ao #18.....	81
Gráfico 5 - Curva de temperatura do Termopar #02	82
Gráfico 6 - Curva de temperatura do Termopar #03	82
Gráfico 7 - Curva de temperatura do Termopar #04	83
Gráfico 8 - Curva de temperatura do Termopar #05	83
Gráfico 9 - Curva de temperatura do Termopar #06	84
Gráfico 10 - Curva de temperatura do Termopar #07	85
Gráfico 11 – Pressão interna durante a calibração	88
Gráfico 12 - Curva de temperatura média dos termopares posicionados centralizados na sala de testes (#19 ao #23).....	90
Gráfico 13 - Temperaturas ao longo da fachada.....	92
Gráfico 14 - Média das temperaturas na selagem resistente ao fogo.....	93
Gráfico 15 - Temperaturas dos termopares #36 e #44.....	94
Gráfico 16 – Fluxo de calor ao longo do ensaio	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Tipos de fachadas, vantagens e desvantagens	22
Quadro 2 – Métodos de envidraçamento	24
Quadro 3 – Tipos de vidros verticais	25
Quadro 4 – Medidas de proteção ativa e passiva	33
Quadro 5 – Ensaio de segurança contra incêndio em fachadas	55
Quadro 6 – Classificação para elementos aplicados em fachadas	60
Quadro 7 – Valores médios para calibração	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensão das janelas e pé direito dos modelos ensaiados	45
Tabela 2 – Resumo dos resultados	46
Tabela 3 – Vazões de gás estabelecidas através da calibração	77
Tabela 4 – Média das temperaturas dos termopares #19 ao #23 e variação.....	80
Tabela 5 – Média das temperaturas dos termopares #16 ao #18 e variação em torno da média da ASTM E2307 e ASTM E2874.	80
Tabela 6 – Termopares na selagem perimetral com temperaturas máximas acima de 100°C	94

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBMESP	Corpo de Bombeiros Militar do Estado de São Paulo
CBMRS	Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Sul
ISO	International Organization for Standardization
IT	Instrução Técnica
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NFPA	National Fire Protection Association
PIR	Poliisocianurato
PVB	Polivinil Butiral
RT	Resolução Técnica
SBI	<i>Single Burning Item</i>
SSG	Silicone Estrutural
TC	Termopar
TRF	Tempo de Resistência ao Fogo
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	16
1.2 PROBLEMA	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 JUSTIFICATIVA	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 FACHADAS ENVIDRAÇADAS.....	19
2.1.1 Caracterização dos Vidros Aplicados em Fachadas	25
2.1.1.1 Vidro Laminado	26
2.1.1.2 Vidro Aramado	26
2.1.1.3 Vidro Insulado	27
2.2 DINÂMICA DOS INCÊNDIOS E PRINCÍPIOS DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO	27
2.2.1 Desenvolvimento do Incêndio	28
2.2.2 Segurança Contra Incêndio	31
2.2.2.1 Regulamentação da Segurança Contra Incêndio no Brasil	36
2.2.3 Meios de Propagação do Fogo nas Fachadas	38
2.3 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM SISTEMAS DE FACHADAS ENVIDRAÇADAS	56
2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE COMPARTIMENTAÇÃO VERTICAL PERIMETRAL	58
2.4.1 Avaliação dos Sistemas de Compartimentação Vertical	59
3 MÉTODO	65
3.1 ESTRUTURA DO APARATO	65
3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	68
3.3 INSTRUMENTAÇÃO	69
3.4 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO	71
3.5 ENSAIO DA SELAGEM PERIMETRAL EM FACHADA PELE DE VIDRO	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO.....	78
4.1.1 Temperaturas Internas.....	78
4.1.2 Temperaturas Externas.....	81
4.1.3 Discussão dos Resultados.....	85
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO DA SELAGEM PERIMETRAL EM FACHADA PELE DE VIDRO.....	90
4.2.1 Temperaturas Internas.....	90
4.2.2 Temperaturas Externas.....	92
4.2.3 Temperaturas Selagem Face Não Exposta	93
4.2.4 Fluxo de Calor	96
4.2.5 Discussão dos Resultados.....	97
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

O adensamento urbano e a verticalização das cidades têm colocado em pauta a segurança contra incêndio das edificações modernas que abrigam cada vez mais usuários. Novas tecnologias e técnicas construtivas estão sendo adotadas, em alguns casos, em prol de valores arquitetônicos meramente estéticos, dos quais pode se destacar os sistemas de vedações verticais externos compostos por fachadas envidraçadas.

Os requisitos de segurança contra incêndio (SCI) são primordiais quando se analisa o desempenho das edificações, seja em etapa de projeto, construção ou uso e manutenção (ONO; VENEZIA; VALENTIN, 2008). Em aspecto global, a segurança contra incêndio é encarada como uma ciência, com exigências específicas dos materiais e componentes das construções, além do desenvolvimento de novas tecnologias e o aprimoramento das legislações e normas (DEL CARLO, 2008).

A segurança contra incêndio tem como premissa minimizar o risco à vida humana e buscar reduzir a perda patrimonial (SILVA *et al.*, 2008). Dentre os requisitos de segurança contra incêndio de uma edificação, que estão diretamente relacionados às etapas de um incêndio, têm-se: dificultar a ocorrência, a propagação e permitir a fuga dos usuários (MITIDIERI, 2008). No aspecto relacionado à propagação do fogo durante o incêndio, tem-se o conceito de compartimentação, podendo ser tanto vertical como horizontal, que é caracterizado por medidas de proteção passiva através de elementos corta-fogo entre pavimentos ou entre um mesmo pavimento (SÃO PAULO, 2019e).

Outro aspecto importante na segurança contra incêndio é a resistência ao fogo, sendo a propriedade de um elemento resistir à ação deste, mantendo sua integridade, segurança estrutural, estanqueidade e isolamento quando submetido a esse fenômeno (SILVA, 2013). No cenário brasileiro, a NBR 14432 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2001) – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações estabelece o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) dos elementos construtivos das edificações, em função da altura, ocupação e uso de uma edificação.

Dentre os itens de segurança contra incêndio em fechamentos verticais, a compartimentação vertical é definida na NBR 15575-4 (ABNT, 2021b) como a capacidade de dificultar a propagação de chama e fumaça a partir do ambiente de

origem do incêndio para outros pavimentos, contribuindo para a fuga dos ocupantes. Com o intuito de especificar os parâmetros que objetivam garantir a compartimentação vertical e a horizontal, impedindo a propagação de incêndios entre pavimentos elevados consecutivos e entre ambientes de um mesmo pavimento, respectivamente, tem-se a Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo – IT 09/2019 – (SÃO PAULO, 2019e).

A utilização de fachadas envidraçadas em edificações tem aumentado nos grandes centros comerciais e capitais brasileiras. Os sistemas de vedação de fachadas envidraçadas tem sido a técnica utilizada pelos projetistas para tornarem as construções esteticamente aceitáveis e imponentes, bem como pela capacidade de utilizar diferentes composições de vidros para buscar maior conservação de energia e maior iluminação interna (WANG, Y. *et al.*, 2017). Este é um fato que pode ser visto como uma preocupação na segurança contra incêndios, devido à fragilidade deste sistema, o que pode ocasionar o comprometimento da compartimentação vertical das edificações (GANDHI *et al.*, 2017; WANG, Y. *et al.*, 2016).

Na realidade brasileira, a segurança contra incêndio tem como principais regras as instruções técnicas feitas pelo Corpo de Bombeiros Militar do Estado São Paulo (CBMESP), mas que são adotadas por praticamente todos os outros Estados brasileiros. Quando se trata de sistemas de fachada das edificações, as principais ITs são: n° 07/2019 (SÃO PAULO, 2019c), IT 08/2019 (SÃO PAULO, 2019d) e IT 09/2019 (SÃO PAULO, 2019e).

Atualmente está em vigor a NBR 14432 (ABNT, 2001a) que estabelece o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) dos elementos construtivos das edificações e NBR 15200 (ABNT, 2012a) sobre projetos de estruturas de concreto em situação de incêndio. Entretanto, não se tem norma técnica brasileira que estabeleça a forma de medição do TRRF para sistemas de compartimentação vertical de uma fachada envidraçada em situação de incêndio. Somando-se a isso, tem-se que a IT 09/2019 (SÃO PAULO, 2019e) estabelece que para fachadas envidraçadas é necessária a adoção de anteparos verticais e o selo corta fogo entre o anteparo e o vidro, o que torna a execução bastante complexa e de difícil conferência.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A presente pesquisa é focada na realização de ensaio de resistência ao fogo de sistema de selagem perimetral em fachada pele de vidro através da implementação de aparato com base na ASTM E2307 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM), 2020b) utilizando sistema de fachada pele de vidro conforme regulamentação nacional a fim de verificar o desempenho do sistema proposto e analisar o comportamento do fogo durante o ensaio.

1.2 PROBLEMA

A escassez de estudos nacionais associada ao adensamento urbano e verticalização das edificações e inexistência de norma técnica que reja o tema de compartimentação vertical em fachadas pele de vidro torna essencial que se desenvolvam pesquisas para fins de garantir a segurança contra incêndio nestas edificações. Através da pesquisa proposta, será possível analisar o comportamento dos elementos construtivos constituintes de fachada envidraçada quando expostos ao fogo.

O estudo dos sistemas de selagem perimetral corta-fogo em fachadas pele de vidro de forma experimental, baseado em norma internacional, será pioneiro no Brasil e poderá indicar o desempenho na compartimentação vertical dos sistemas que contemplam as fachadas envidraçadas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho de selagem perimetral indicada para fachada pele de vidro para compartimentação vertical do sistema de fachada quando exposta ao fogo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) analisar o sistema construtivo de fachada pele de vidro e respectiva compartimentação vertical através da solução proposta pela instrução

- técnica do corpo de bombeiros, considerando o parapeito de 1,20 metros e a barreira perimetral;
- b) contribuir com o desenvolvimento de estudo pioneiro na análise de sistemas de barreiras perimetrais em fachadas cortina para futura criação de norma brasileira específica para este tema;
 - c) analisar o efeito do *leapfrogging* incidente nas fachadas quando da ocorrência de propagação externa do fogo na edificação;
 - d) Realizar a montagem e a calibração do aparato proposto com base na ASTM E2307 (ASTM, 2020).

1.4 JUSTIFICATIVA

Segundo Silva *et al.* (2008) o desenvolvimento de novas tecnologias construtivas tornou os projetos ainda mais complexos, enquanto o mercado ainda carece de profissionais especializados em segurança contra incêndio.

A resistência e a durabilidade de um material são dois dos principais critérios para a tomada de decisão na etapa de projeto, fazendo com que o desenvolvimento de novas tecnologias busque melhorar estes atributos. As elevadas temperaturas ocasionadas em situações de incêndio podem causar danos severos às estruturas devido à resposta dos materiais componentes às altas temperaturas, de forma a requerer estudos aprofundados do tema (YEHIA; KASHWANI, 2013).

No decorrer dos anos, no Brasil, as discussões técnicas relativas à segurança contra incêndio em edifícios foram precedidas de grandes sinistros e, posterior a estes, foram elaboradas leis e regulamentações relacionadas ao tema (RODRIGUES, 2016). Antes dos anos 2000, ocorreram os casos: Edifício Andraus, em 1972, na cidade de São Paulo, Edifício Joelma, em 1974. No primeiro citado, a edificação era composta por fachada envidraçada que facilitou a propagação das chamas; no segundo, houve a propagação pela fachada de alvenaria devido às pequenas distâncias entre aberturas (DEL CARLO, 2008).

Mais recentemente, no Brasil, ocorreram os incêndios da Boate Kiss (G1 RS, 2013) e o Edifício Wilton Paes de Almeida (MESQUITA; SOUZA; BARIFOUSE, 2018). No exterior, outros sinistros podem ser listados como marcantes na humanidade: Torre Grenfell em Londres, Torre Torch em Dubai.

As leis e regulamentações técnicas que consideram a segurança contra incêndio foram concebidas ao longo dos últimos anos, na sua maior parte, após a ocorrência de incêndios (RODRIGUES, 2016). Com o objetivo de proteger a sociedade brasileira de eventuais futuros sinistros, a Norma de Desempenho, ABNT NBR 15575 (ABNT, 2021a) e a Lei Federal 13.425 (BRASIL, 2017) entraram em vigor. A normativa estabelecendo critérios mínimos com relação à segurança contra incêndio: dificultar a propagação, ignitabilidade, resistência ao fogo e compartimentação horizontal. Enquanto a lei estabeleceu diretrizes gerais e ações complementares sobre prevenção e combate a incêndio.

A segurança contra incêndio em fachadas vem sendo discutida e aprimorada, visando ao desenvolvimento de regulamentação em prol da segurança da sociedade. A afirmação é corroborada pela recente publicação da NBR 16951 (ABNT, 2021c) que trata sobre método de ensaio para reação ao fogo de sistemas e revestimentos externos de fachada. Entretanto, existem lacuna normativa e carência de pesquisas sobre os sistemas que garantem a compartimentação vertical em fachadas envidraçadas e que serão abordados na presente pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta levantamento bibliográfico necessário para a realização do presente trabalho, dividido em quatro itens. O primeiro aborda os tipos de fachadas envidraçadas existentes, sistemas construtivos e vidros que compõem o fechamento. O segundo trata sobre a dinâmica dos incêndios, os principais conceitos de segurança contra incêndio e formas de propagação nas fachadas. O terceiro detalha a segurança contra incêndio em fachadas envidraçadas através do uso de proteções contra propagação interna e propagação externa. E o quarto esmiúça as metodologias existentes para avaliação dos sistemas de compartimentação vertical em fechamentos periféricos de fachadas envidraçadas.

2.1 FACHADAS ENVIDRAÇADAS

As fachadas são elemento externo fundamento para caráter estético externo de um prédio. Elas necessitam preencher aspectos básicos como proteção contra o fogo, roubo, influências climáticas e poluição ambiental (GUNASEKARAN; PREMALATHA; MALINI, 2010). As fachadas das edificações são responsáveis por transmitir o valor de cada edificação, sendo elemento-chave no conforto dos usuários e podem atingir o custo de 25% do valor total dos projetos (ZEMELLA; FARAGUNA, 2014).

As fachadas envidraçadas, também conhecidas como fachadas cortina e popularmente referidas como “pele de vidro”, estão sendo amplamente utilizadas nos grandes centros comerciais e urbanos, consolidando-se como estilo arquitetônico internacional (ANDREIS; BESEN; WESTPHAL, 2014; CHEN; LU, 2018).

Entretanto, quando clientes e arquitetos decidem por utilizar fachadas envidraçadas, eles acabam concentrando toda a responsabilidade de design na fachada, como sinônimo de desenvolvimento tecnológico, porém pode gerar um maior consumo de energia na edificação (ZEMELLA; FARAGUNA, 2014).

Com relação a situações de incêndio, ainda se tem dúvidas quanto ao seu comportamento em altas temperatura. Portanto, este capítulo aborda conceitos que compõem o assunto.

A fachada de uma edificação é responsável por garantir a separação do ambiente interno dos agentes externos, controlando a entrada de ar, calor, frio, luz,

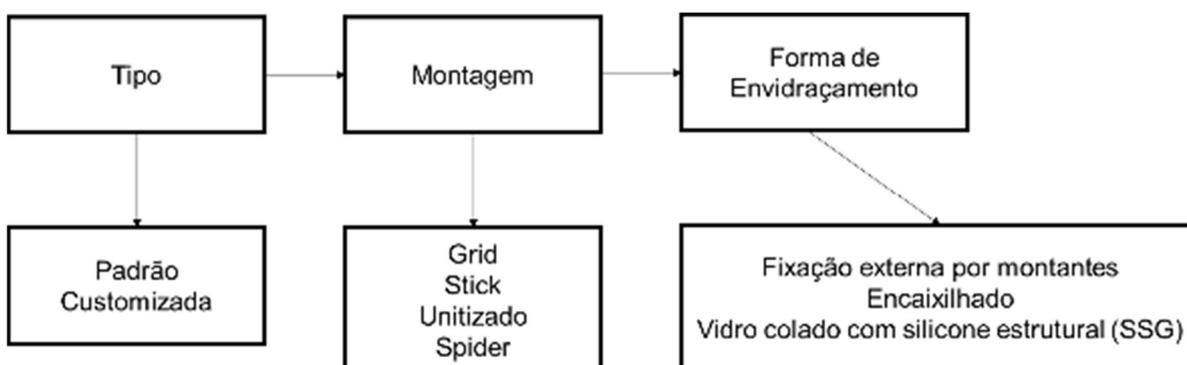
ruídos e odores (ANDREIS; BESEN; WESTPHAL, 2014; CHEN; LU, 2018). Existem diferentes sistemas construtivos que podem ser utilizados nas fachadas, mas, quando utilizadas as fachadas envidraçadas, as principais justificativas, segundo *Shameri et al.* (2011), são: transparência, admissão de luz natural no interior e estética, sendo esta última valorizada por investidores e projetistas.

De forma genérica, o sistema de fachadas cortina pode ser caracterizado como painéis de vidro com montantes e travessas horizontais, que envolve materiais heterogêneos, com exigências técnicas específicas, e seu desempenho adequado depende de um complexo conjunto marcado por interdisciplinaridade (CHEN; LU, 2018).

Conforme conceituado pela NBR 10821-1 (ABNT, 2017a), fachada cortina pode ser caracterizada como um sistema de esquadrias interligadas e estruturadas, com função de vedação, que forma um sistema contínuo, desenvolvendo-se no sentido da altura e/ou largura da fachada da edificação, sem interrupção, por pelo menos dois pavimentos. No mesmo sentido, Oliveira (2009) caracteriza como fachada leve, com uma ou mais camadas, na extremidade da edificação, formando uma pele sobre esta.

Os sistemas de pele de vidro podem ser classificados de diferentes formas, mas as mais comuns são de acordo com o seu tipo, a forma de construção e de envidraçamento (MAKEPEACE *et al.*, 2004). Conforme indicado pela NBR 14925 (ABNT, 2019), a resistência ao fogo das fachadas envidraçadas depende diretamente de seus componentes e forma de fixação. Na Figura 1, consta a sequência de categorias para a classificação das fachadas envidraçadas.

Figura 1 – Sequência de categorias para classificação de fachadas envidraçadas



Fonte: Adaptado de Makepeace *et al.* (2004).

Segundo Campos (2011), as fachadas cortina podem ser divididas quanto às suas características estéticas: pele de vidro, *structural glazing* e grid, e também pelo seu sistema construtivo: *stick*, unitizado e híbrido.

As fachadas cortina de vidro podem ser classificadas segundo seu processo de montagem, podendo ser montadas no local (*stick*) ou aquelas que cujos os componentes são unidos direto na fábrica, conhecido como sistema unitizado (OLIVEIRA, 2009). A autora ainda indica a possibilidade de classificar quanto à fixação dos componentes: fixação mecânica, colagem ou mista. No Quadro 1, podem-se observar as vantagens e desvantagens de cada tipo de sistema de fachada envidraçada.

Conforme descrito pela Associação Nacional de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (VIDROS ..., 2007), as fachadas envidraçadas podem ser caracterizadas segundo as classificações abaixo:

- a) sistema *Structural glazing*: envidraçamento estrutural com pouca ou nenhuma estrutura de aço ou alumínio. Utilizada em lobbies de edifícios comerciais com grandes vãos. O vidro deve ser temperado, mas pode receber outro beneficiamento adicional.
- b) sistema *Stick* (pele de vidro): as colunas e travessas são instaladas primeiro; posteriormente aplicam-se os quadros de alumínio e vidro. São conhecidas por pele de vidro, pois as colunas ficam do lado interno da edificação. Exigem montagem externa com andaimes fachadeiros ou balancins.
- c) sistema *Grid*: há colunas aparentes que estruturam a fachada. As travessas horizontais também são aparentes. São reconhecidas por apresentarem linhas horizontais e verticais ao observador externo.
- d) sistema Unitizado: a coluna é dividida em duas partes e, conseqüentemente, a esquadria configura-se em módulos. A montagem dos módulos é feita pelo lado interno da edificação.

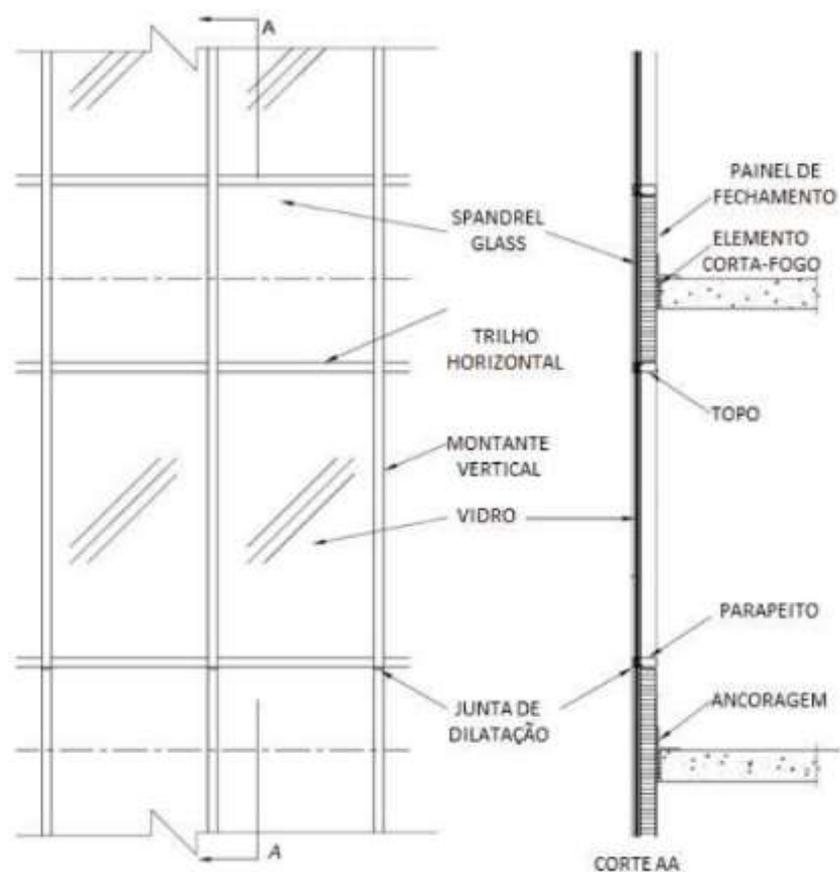
Quadro 1– Tipos de fachadas, vantagens e desvantagens

Tipo de Fachada	Utilização	Vantagens	Desvantagens
<i>Grid</i>	Indicado para fachadas de menor porte e edificações térreas	Simplicidade na execução, colocação em etapas com auxílio de andaimes e facilidade de transporte dos elementos	Montagem em pequenos módulos, vidro a vidro, os montantes ficam aparentes nos dois eixos
<i>Stick</i>	Obras de pequeno e médio porte	Colocação da malha estrutural e posteriormente dos vidros encaixilhados ou colados. Facilidade de transporte dos elementos	Montagem em módulos médios, vidro a vidro na obra
Unitizado	Obras de grande porte	Velocidade na montagem devido à colocação de grandes módulos prontos. Alto controle de qualidade na fabricação dos módulos e fixação dos vidros por <i>structural glazing</i>	Dificuldade no transporte e colocação dos módulos, necessitando de guindaste
<i>Spider Glass</i>	Todos os tipos de obras	Facilidade de adaptação a qualquer edificação, apelo arquitetônico e alto valor agregado.	Custo e necessidade de mão de obra especializada para montagem

Fonte: Adaptado de Makepeace *et al.* (2004)

Segundo Oliveira (2009), as fachadas podem ser constituídas por: componentes de fechamento (placas de vidro), isolantes térmicos, estrutura secundária (perfis metálicos) e componentes de vedação das juntas. Neste sentido, a Figura 2 apresenta a terminologia adequada para a descrição dos componentes da fachada:

Figura 2 – Elementos de uma fachada cortina



Fonte: Adaptado de Makepeace *et al.* (2004)

Além da forma de montagem dos sistemas de fachada, a forma fixação do vidro na estrutura também é definitiva para a classificação dos sistemas. Segundo Makepeace *et al.* (2004), o vidro pode ser aplicado das seguintes formas: fixação externa por montantes, encaixilhado e colado silicone estrutural (SSG). Conforme descrito no Quadro 2.

Quadro 2 – Métodos de envidraçamento

Método de Envidraçamento	Descrição
Fixação externa por montantes	<ul style="list-style-type: none"> - Método mais comum; - Utiliza montantes externos para o vidro contra a estrutura; - A pressão é a aplicada na junta através de sistema de parafuso e placa; - Vidro instalado pelo exterior da estrutura; - A junta externa é uma barreira contra a infiltração de água, mas não necessariamente à prova d'água;
Encaixilhado	<ul style="list-style-type: none"> - Batente interno ou externo removível; - Utiliza fita e junta de borracha comprimidas pelo batente, selando o sistema; - O vidro é instalado pelo lado em que tem o batente removível.
Silicone Estrutural (SSG)	<ul style="list-style-type: none"> - Pode ter dois ou quatro lados colados com o silicone; - Quando utilizado em apenas dois lados do vidro, os outros dois são fixados através de placas de pressão. Pode ser instalado em campo; - Quando os quatro lados são colados com o silicone, deve ser feito na fábrica por conta do controle de qualidade.

Fonte: Adaptado de Makepeace *et al.* (2004).

Independente da forma de fixação adotada, a NBR 7199 (ABNT, 2016) estabelece disposições a serem seguidas, dentre elas: as peças de vidro devem ser instaladas de forma que não sofram esforços de dilatação, contração, vibração ou deformação das esquadrias, não deve haver contato entre as chapas de vidro, ou vidro com outro material com dureza superior à sua. A mesma norma ainda caracteriza o sistema *structural glazing*, que faz uso de adesivos ou fitas estruturais para realizar a colagem dos vidros nas estruturas portantes.

A segurança contra incêndio depende, não apenas da forma de fixação do vidro, do tipo de fachada utilizada ou do tipo de vidro utilizado, mas também da qualidade dos materiais e da qualidade de aplicação dos sistemas. Gandhi *et al.* (2017) ensaiaram o sistema de fachada cortina em escala real com vidros fixados com a técnica de *structural glazing* em situação de incêndio, o que resultou na falha do sistema de fixação dos módulos, ocasionando a queda dos painéis e a rápida propagação vertical das chamas.

Os sistemas de fachada cortina com fixação por *structural glazing* foram comparados com o sistema de fixação externa por montantes, em ensaio de escala

real em situação de incêndio, sendo que a fixação por silicone alcançou melhores resultados de isolamento térmico conforme estudo de Kinowski, Sedlak e Sulik (2016). Entretanto, os autores alertam que este sistema requer maior atenção na qualidade da execução, pois a falha da selagem pode ocasionar o comprometimento de todo o sistema. Quanto à resistência ao fogo, os autores analisaram que ambos alcançaram resultados parecidos e satisfatórios.

2.1.1 Caracterização dos Vidros Aplicados em Fachadas

O vidro plano, também denominado como “float” por conta do seu sistema de produção, pode ser utilizado no revestimento de edifícios, janelas e para-brisas de automóveis (MONTANO; BASTOS, 2013). Este pode ser utilizado em diferentes formas de processamentos, gerando outros tipos de vidros, tais como: curvo, laminado, temperado, insulado e fotovoltaico, e podendo ser utilizado onde não se tenha risco de impacto humano (WESTPHAL, 2020).

Com a utilização dos vidros planos na construção civil e por conta da sua forma de fragmentação quando quebrado, gerando lascas que podem causar ferimentos, desenvolveram-se os vidros de segurança: laminado, temperado e aramado (WESTPHAL, 2020). Corroborando a segurança na utilização de vidro na construção civil, tem-se a NBR 7199 (ABNT, 2016) que estabelece os tipos de vidros que podem ser utilizados em diferentes aplicações.

Considerando que a presente pesquisa trata sobre as fachadas envidraçadas, o Quadro 3 lista os tipos de vidro aptos a serem adotados nestas:

Quadro 3 – Tipos de vidros verticais

Aplicações	Casos Usuais	Tipo(s) de vidro
Vidros verticais em fachadas	A partir do primeiro pavimento (inclusive), abaixo da cota de 1,10 metros em relação ao piso;	- Vidro laminado de segurança; - Vidro aramado;
	No pavimento térreo, que dividam ambientes com desnível superior a 1,50 metros.	- Vidro insulado composto com os vidros citados anteriormente

Fonte: Adaptado de NBR 7199 (ABNT, 2016).

De forma mais específica sobre segurança contra incêndio, a NBR 7199 (ABNT, 2016) prescreve a utilização de vidros com propriedades que retardam a propagação do fogo em fechamentos onde é exigida uma resistência à propagação

do fogo durante um período determinado. Assim, a normativa prescreve a utilização de vidro laminado com camada intermediária resistente ao fogo, vidro aramado e vidro insulado.

2.1.1.1 Vidro Laminado

O vidro laminado é composto por duas ou mais camadas de vidro *float* em conjunto com uma ou mais camadas intermediárias de polivinil butiral (PVB) ou outro material plástico (PVA ou resina), garantindo que os fragmentos, em caso de quebra, fiquem presos ao material, reduzindo os riscos de ferimentos (WESTPHAL, 2020). Segundo Makepeace *et al.* (2004), o comportamento do vidro laminado quando quebrado é uma das suas propriedades que o torna material muito utilizado nas fachadas cortina.

O vidro laminado ainda pode ser classificado como antichamas se composto por duas ou mais camadas de vidro antichamas com material adesivo antichamas entre as camadas de vidro que, se exposto a altas temperaturas, se expande, formando uma camada resistente ao fogo (ZHOU, 2014).

Corroborando, a NBR 14697 (ABNT, 2001b, p. 2) define vidro laminado como “conjunto composto de uma chapa de vidro com uma ou mais chapas de vidro ou material plástico unidos com uma ou mais camadas intermediárias”, com vidros de diversos tipos: *float*, temperado, colorido, polido, aramado, entre outros. Além da variação do tipo de vidro, a combinação da camada intermediária pode proporcionar diferentes resultados: resistência ao fogo, ao impacto, controle solar e isolamento acústico.

De forma complementar, a norma indica que a camada intermediária tem a função de reter os fragmentos do vidro, reduzindo o risco de ferimentos e caracterizando como vidro de segurança laminado (ABNT, 2001b).

2.1.1.2 Vidro Aramado

O vidro aramado é aquele que possui tela de aço implantada no seu interior, com a função de reter os fragmentos no momento de eventual quebra. Em situações de incêndio, o vidro aramado se quebra, porém se mantém preso à tela metálica, impedindo o espalhamento das chamas (WESTPHAL, 2020). O autor ainda indica que

os benefícios deste sistema são: baixo custo, proporciona privacidade e não prejudica a luminosidade do ambiente, mas com a desvantagem de que as bordas nunca devem estar expostas às intempéries por conta de possível oxidação do aço, comprometendo a integridade do vidro e, por consequência, a segurança do sistema.

Segundo a NBR NM 295 (ABNT, 2004), os vidros aramados podem ser translúcidos ou transparentes, compostos por vidro plano, incolor ou colorido. A mesma normativa ainda especifica requisitos mínimos de qualidade em relação aos defeitos óticos, de aspectos e da tela metálica inserida no vidro.

2.1.1.3 Vidro Insulado

Conforme caracterizado pela NBR 16015 (ABNT, 2012b), vidro insulado é caracterizado como sistema de duas ou mais placas de vidro paralelas, separadas por um espaçador, hermeticamente seladas ao longo de todo seu perímetro, formando uma câmara estanque e desidratada em seu interior, que ainda pode conter gases inertes para melhorar o comportamento térmico e/ou acústico. Segundo Westphal (2020), o vidro insulado pode ser composto por chapas de vidro temperado e laminado, com o objetivo de aumentar a segurança do sistema contra ocorrência de ferimentos quando há risco de impactos.

Conforme já apresentado no Quadro 3, a NBR 7199 (ABNT, 2016) define que o vidro insulado utilizado nos sistemas de fachada obrigatoriamente precisa ser composto por vidro laminado ou aramado, a partir do primeiro pavimento.

2.2 DINÂMICA DOS INCÊNDIOS E PRINCÍPIOS DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

Conhecer a dinâmica dos incêndios é fator primordial para poder-se pensar em segurança contra incêndio. O presente subcapítulo apresenta uma revisão sobre os conceitos de desenvolvimento e segurança contra incêndio, abordando temas que são regulamentados por normas ou instruções técnicas brasileiras e as formas de propagação do fogo através das fachadas das edificações.

2.2.1 Desenvolvimento do Incêndio

No decorrer dos anos, os projetos das construções foram se alterando e se adaptando aos interesses da sociedade: o tamanho, geometria e disposição dos ambientes mudaram, novos materiais e equipamentos foram desenvolvidos, mas os fenômenos físico-químicos envolvidos no desenvolvimento do fogo não se alteraram (DŽOLEV; LABAN; DRAGANIĆ, 2021).

Dessa forma, para que se pense em prevenção e combate a incêndios, é necessário ter conhecimento de que o fogo é uma reação de oxidação com liberação de calor e luz, composta por quatro elementos que devem coexistir: combustível, oxigênio, calor e reação em cadeia (SÃO PAULO, 2019a).

Segundo Seito (2008), cada incêndio possui sua peculiaridade, pois são vários os fatores que influenciam para seu início e no seu desenvolvimento, podendo-se destacar alguns:

- a) forma geométrica e dimensões do ambiente;
- b) superfície específica dos materiais combustíveis envolvidos;
- c) distribuição e quantidade dos materiais combustíveis no local;
- d) características de queima dos materiais envolvidos;
- e) local de início do incêndio no ambiente;
- f) aberturas entre ambientes passíveis de propagação do incêndio.

Existem dois tipos de incêndio: aquele controlado pela quantidade de material combustível disponível e aquele controlado pela quantidade de oxigênio disponível. Em caso de edifícios, geralmente ocorrem incêndios controlados pela quantidade de material combustível disponível, no qual a combustão produz chamas, enquanto que, na falta de oxigênio, a combustão do material ocorre lentamente, sem chamas (SCHABOWICZ *et al.*, 2022).

Existem dois tipos de combustão dos materiais: *smouldering* (incompleta) e *flaming* (completa) (BUCHANAN, 2001). A combustão incompleta tem por característica temperaturas mais baixas, propagação mais lenta, produção de fumaça e monóxido de carbono e, pelas temperaturas inferiores, pode não ocasionar o acionamento de *sprinklers* e detectores de fumaça (BUCHANAN, 2001; OHLEMILLER, 1985). A combustão incompleta já foi a principal causa de vítimas

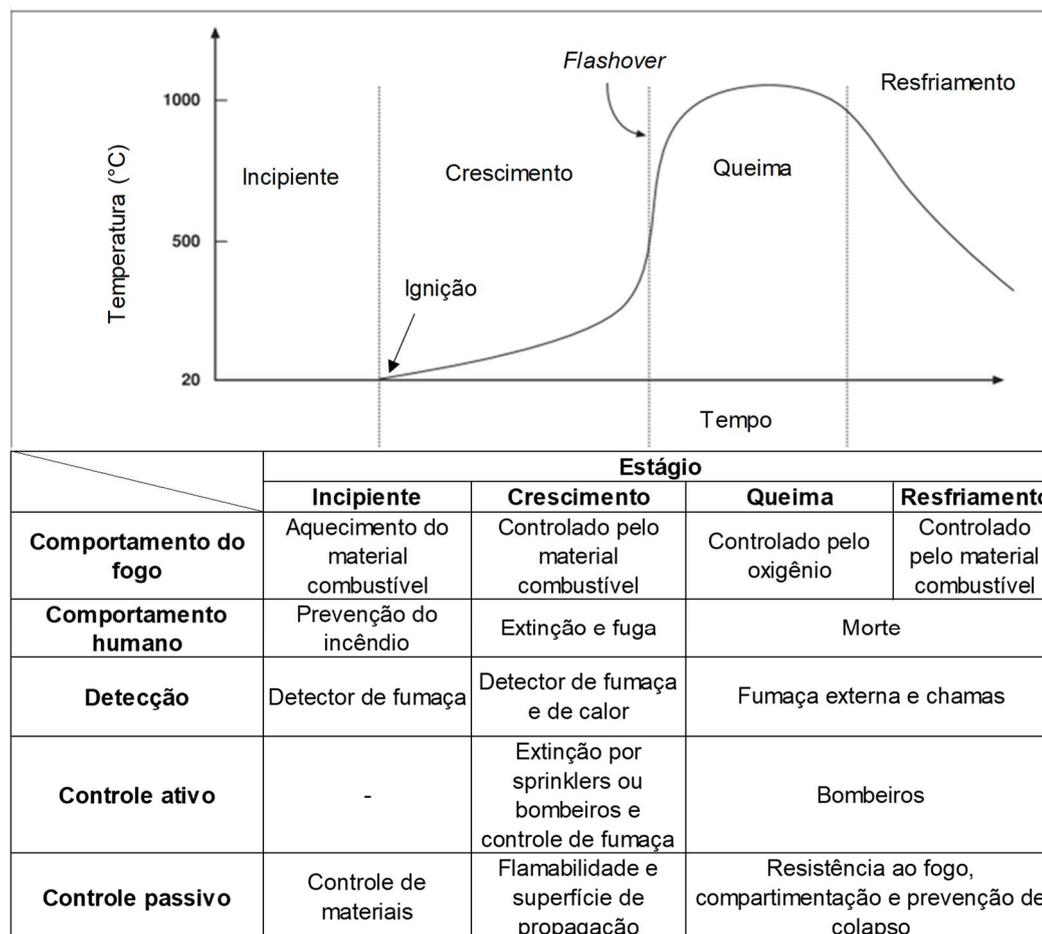
fatais em incêndios em residências nos Estados Unidos devido aos cigarros e móveis, tais como colchões (CLARKE III; OTTOSON, 1976).

A combustão completa possui maior taxa de propagação, maiores temperaturas e a produção de chamas, o que possibilita a formação de dióxido de carbono e vapor de água (BUCHANAN, 2001).

Em um incêndio real, a curva representativa da variação de temperatura é caracterizada por dois momentos (ascendente e descendente) e três estágios delimitados por pontos específicos (*flashover* e temperatura máxima) conforme ilustrado na Figura 3 e descrito a seguir (COSTA, 2008; COSTA; SILVA, 2003; BRITZ; CARVALHO; HELENE, 2019):

- a) ignição: estágio inicial da inflamação, crescimento gradual da temperatura, início da queima do combustível. A fase de ignição permanece até o instante de *flashover*, quando ocorre a inflamação generalizada do ambiente;
- b) fase de aquecimento: mudança repentina da temperatura quando todos os materiais combustíveis no ambiente entram em combustão, atingindo temperaturas máximas, geralmente superiores a 1000°C;
- c) fase de resfriamento: redução gradativa da temperatura dos gases do ambiente, ocorre após a extinção do material combustível presente no ambiente.

Figura 3 – Curva temperatura-tempo de um incêndio real e respectivos estágios



Fonte: Adaptado de Buchanan (2001).

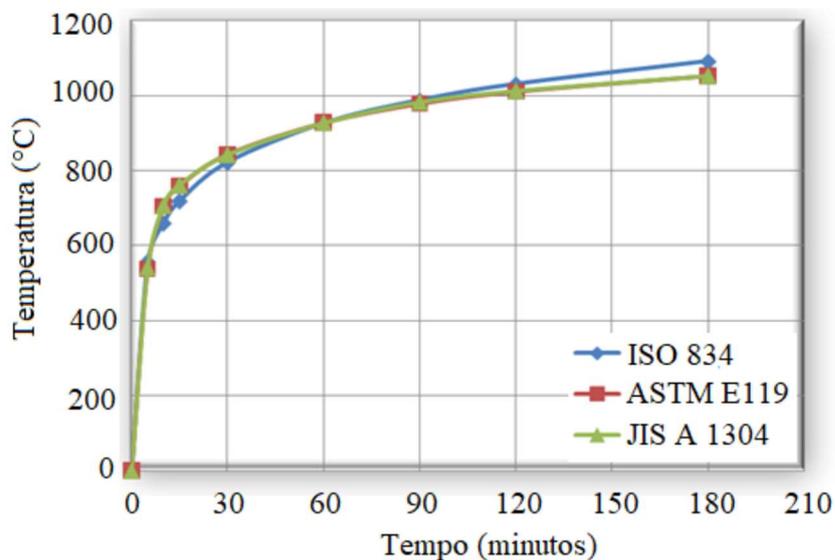
Simular uma situação real de incêndio em uma estrutura é uma atividade bastante complexa e depende de diversas variáveis, visto que cada incêndio possui suas peculiaridades e que interferem diretamente na temperatura máxima atingida, duração e taxa de aquecimento (BRITTEZ; CARVALHO; HELENE, 2019).

Para facilitar a determinação da ação térmica nas estruturas, a curva real (ilustrada na Figura 3) foi substituída por modelos matemáticos que deram origem às curvas padronizadas, que descrevem a variação da temperatura do compartimento em função do tempo de exposição ao fogo. Dentre as curvas padronizadas de incêndio, a estabelecida pela ISO-834 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), 1999) é a mais difundida internacionalmente, independente do ambiente e carga de incêndio (BRITTEZ; CARVALHO; HELENE, 2019; COSTA; SILVA, 2003).

Segundo levantamento feito por Phan (1996), ao realizar análise de estudos experimentais que envolvem simulação de situações de incêndio em elementos de

concreto, as curvas padronizadas de incêndio mais seguidas foram: ISO 834, ASTM E119 e JIS A 1304 . De forma ilustrativa, os autores Britez, Carvalho e Helene (2019) sobrepõem as três curvas na Figura 4 demonstrando a similaridade entre elas:

Figura 4 – Sobreposição das curvas padronizadas mais utilizadas



Fonte: Britez, Carvalho e Helene (2019, p. 6).

2.2.2 Segurança Contra Incêndio

Nos dias atuais, grande parte da população mundial reside em centros urbanos e habitam em prédios com vários pavimentos, seja como moradia ou para trabalho, densificando as cidades e tornando crucial o desenvolvimento de técnicas construtivas que garantam a segurança contra incêndio da população (YILMAZ, 2022).

Segundo a autora Yilmaz (2022), dentre as preocupações e medidas a serem adotadas para garantir a segurança, tem-se a relação entre resistência ao fogo da edificação (caracterizada como a capacidade da estrutura a resistir ao colapso em altas temperaturas) e a severidade do fogo, que mede o potencial destrutivo, visto que quanto maior a carga térmica, maior será o dano na edificação.

A etapa de projeto das edificações é fundamental para a segurança contra incêndio, pois é nela que as necessidades são identificadas e as soluções apresentadas, tornando a segurança contra incêndio preventiva, além do que prioritariamente combativa (ONO; VENEZIA; VALENTIN, 2008). Segundo Ono (2008), a segurança contra incêndio pode ser garantida através de medidas de prevenção, destinadas a

prevenir o sinistro, e medidas de proteção, destinadas a proteger os usuários e bens materiais.

As medidas de proteção, por sua vez, podem ser classificadas como medidas de proteção passiva e medidas de proteção ativa, que deveriam ser contempladas no projeto arquitetônico, de forma a garantir a segurança contra incêndio da edificação (ONO, 2008; ONO; VENEZIA; VALENTIN, 2008). Neste sentido, a NBR 14432 (ABNT, 2001a, p. 3) define o que segue:

proteção ativa: Tipo de proteção contra incêndio que é ativada manual ou automaticamente em resposta aos estímulos provocados pelo fogo, composta basicamente das instalações prediais de proteção contra incêndio.
proteção passiva: Conjunto de medidas incorporado ao sistema construtivo do edifício, sendo funcional durante o uso normal da edificação e que reage passivamente ao desenvolvimento do incêndio, não estabelecendo condições propícias ao seu crescimento e propagação, garantindo a resistência ao fogo, facilitando a fuga dos usuários e a aproximação e o ingresso no edifício para o desenvolvimento de ações de combate.

De forma análoga, as medidas de proteção ativas se relacionam mais com as instalações prediais, enquanto que as passivas à arquitetura da edificação (NEGRISOLO, 2011). Segundo Rodrigues (2016), as medidas de proteção passivas são capazes de atender às necessidades dos usuários em situações normais e, em situações de incêndio, têm a propriedade de retardar ou impedir o espalhamento das chamadas e o aumento da emissão de fumaça, possibilitando a fuga dos ocupantes da edificação.

As medidas de proteção passiva se fazem presentes em todas as etapas do incêndio: controle de materiais antes da ignição, inflamabilidade e distribuição dos materiais quando da ignição até o *flashover* e resistência e compartimentação ao fogo da estrutura (BUCHANAN, 2001). Com relação às medidas ativas, o autor aponta que elas se tornam importantes a partir da ignição: extinção do fogo (*sprinklers*, extintores) e controle de fumaça e, após *flashover*, seria através do Corpo de Bombeiros.

As principais medidas de proteção, tanto passivas quanto ativas, podem ser destacadas conforme constante no Quadro 4.

Quadro 4 – Medidas de proteção ativa e passiva

Elemento	Medidas de proteção passiva	Medidas de proteção ativa
Limitação do crescimento do incêndio	- Controle da quantidade de materiais combustíveis incorporados aos elementos construtivos; - Controle das características de reação ao fogo dos materiais e produtos incorporados aos elementos construtivos.	- Provisão de sistema de alarme manual; - Provisão de sistema de detecção e alarme automáticos.
Extinção inicial do incêndio	-----	- Provisão de equipamentos portáteis (extintores de incêndio).
Limitação da propagação do incêndio	- Compartimentação vertical; - Compartimentação horizontal.	- Provisão de sistema de extinção manual (hidrantes e mangotinhos); - Provisão de sistema de extinção automática de incêndio.
Evacuação segura do edifício	- Provisão de rotas de fuga seguras e sinalização adequada.	- Provisão de sinalização de emergência; - Provisão do sistema de iluminação de emergência; - Provisão do sistema do controle do movimento de fumaça; - Provisão de sistema de comunicação de emergência.
Precaução contra a propagação do incêndio entre edifícios	- Resistência ao fogo da envoltória do edifício, bem como de seus elementos estruturais; - Distanciamento seguro entre edifícios.	-----
Precaução contra o colapso estrutural	- Resistência ao fogo da envoltória do edifício, bem como de seus elementos estruturais.	-----
Rapidez, eficiência e segurança das operações de combate e resgate	- Provisão de meios de acesso dos equipamentos de combate a incêndio e sinalização adequada.	- Provisão de sinalização de emergência; - Provisão de sistema de iluminação de emergência; - Provisão do sistema do controle do movimento da fumaça.

Fonte: Ono (2008, p. 102).

Os perigos de situações de incêndio tendem a ser amplificados com o aumento da altura e complexidade das edificações. O local de incidência do incêndio, a velocidade de fuga dos usuários, acesso e possibilidade de combate das chamas são situações que se tornam mais complexas em edifícios altos, necessitando de

planejamento prévio, treinamentos e manutenção periódica (ONO; VENEZIA; VALENTIN, 2008).

Usualmente, os edifícios mais altos têm vocação predominantemente comercial de escritórios, com elevada densidade populacional e, por consequência, possuem dificuldades específicas com relação à segurança contra incêndio (ONO; VENEZIA; VALENTIN, 2008). Os autores ainda classificam como “edifícios altos” aqueles em que o pavimento mais elevado excede a capacidade de alcance dos equipamentos de combate ao fogo.

Com o aumento da altura das edificações e desenvolvimento de sistemas mais modernos, tais como fachada envidraçada e outros sistemas de revestimento externo, novos problemas de segurança contra incêndio se manifestaram: reação ao fogo dos materiais de revestimento das fachadas, acelerando a propagação das chamas pela edificação; o surgimento do efeito chaminé em escadas, dutos de serviço e dutos de elevadores, acelerando a propagação das chamas e dificultando a fuga dos usuários; dificuldade de detecção e combate ao fogo; dificuldade de abandono da edificação por parte dos usuários; e possibilidade de propagação do calor para os edifícios adjacentes (ONO; VENEZIA; VALENTIN, 2008; SUN; HU; ZHANG, 2013).

Considerando o aumento da altura das edificações, popularização de sistemas construtivos e modularização na construção civil, a utilização de sistemas de compartimentação vertical e horizontal com resistência ao fogo adequada se tornou ainda mais importante. A exemplo de sistemas construtivos com modularização, têm-se as paredes de concreto que tendem a sofrer a ocorrência de *spalling* quando expostas ao fogo (GIL *et al.*, 2017).

Neste sentido, foi realizado estudo comparativo de paredes de concreto armado com espessuras de 10 e 14 centímetros, com o mesmo traço, para fins de análise e constatação do desempenho dos sistemas em prol do isolamento térmico, estanqueidade e estabilidade estrutural (BOLINA *et al.*, 2015). De forma conclusiva, os autores revelaram que ambos sistemas atenderam as condições de isolamento térmico, estanqueidade e estabilidade estrutural, apesar de que a parede com 14 centímetros de espessura apresentou maiores deformações, mas ainda dentro do aceitável.

De forma complementar, Gil *et al.* (2017) fez a comparação de três sistemas de paredes de concreto: concreto armado, concreto protendido e concreto armado com fibras, todas com dimensões de 300 x 300 x 10 centímetros, para fins de analisar o

desempenho destes sistemas em situações de incêndio. Com os resultados, os autores constataram que o concreto protendido teve pior resultado, não atendendo a estabilidade estrutural de 240 minutos e apresentando *spalling* a partir dos 18 minutos de ensaio. Já a amostra de concreto armado atendeu a estabilidade estrutural e integridade para 240 minutos, falhando para o parâmetro de isolamento térmico aos 210 minutos de ensaio e apresentando *spalling* na parte inferior da amostra. Já o concreto armado com fibras atingiu estabilidade estrutura e integridade para 240 minutos, falhando para isolamento térmico aos 140 minutos de ensaio e apresentando *spalling* de forma isolada na parte inferior da amostra.

A resistência ao fogo da estrutura de uma edificação pode ser definida através do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), que pode ser descrito como o tempo mínimo que os elementos construtivos devem resistir em uma situação padronizada de incêndio (SILVA *et al.*, 2008).

Os TRRFs são definidos pela NBR 14432 (ABNT, 2001a) em função da ocupação, uso e altura da edificação e levando em consideração as cargas específicas de incêndio. Com relação à altura das edificações, a norma identifica cinco classes, sendo que a última se enquadraria para alturas superiores a trinta metros, com TRRF predominantemente de 120 minutos.

Conforme consta na NBR 15575 (ABNT, 2021b), as paredes estruturais de compartimentação e adjacentes a áreas comuns devem atender ao mínimo de 30 minutos de resistência ao fogo, para edifícios residenciais unifamiliares, isolados, até dois pavimentos, e o tempo exigido aumenta conforme o uso, ocupação e altura da edificação.

De forma complementar, a IT 08 (SÃO PAULO, 2019d) apresenta TRRFs em oito classes relacionadas à altura das edificações e o respectivo uso (classe P1 a P8), a última enquadra construções com altura entre 150 a 250 metros, com TRRF predominantemente de 180 minutos. A Instrução Técnica inova ao apresentar tabela de resistência ao fogo de sistemas previamente ensaiados, tanto para paredes de alvenaria como para paredes de *drywall*.

A reação ao fogo pode ser caracterizada como a resposta de um produto, ao contribuir pela sua própria decomposição, para um fogo a que está exposto, sob condições específicas, conforme NBR 16626 (ABNT, 2017b). As características dos materiais que interferem para sua respectiva classificação a reação ao fogo são: facilidade para ignição, capacidade de sustentar a combustão, rapidez de propagação

da chama pela superfície do material, quantidade e taxa de desenvolvimento de calor liberados no processo de combustão, desprendimento de partículas em chama/brasa e desenvolvimento de fumaça e gases nocivos (MITIDIERI, 2008).

Com o desenvolvimento de sistemas construtivos inovadores ao longo do tempo, através da utilização de materiais com propriedades específicas, a verificação de atendimento à norma brasileira de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2021b) passou a ser, nestes casos, o único instrumento técnico e legal que possibilita garantir a segurança contra incêndio dos usuários (FELIX; ONO; OLIVEIRA, 2022).

Um exemplo destes materiais são os painéis sanduíches com poliisocianurato (PIR), iniciaram com uso industrial mas passaram a ser adotados em edificações comerciais e residenciais como revestimento de paredes e telhados (MURILLO A. *et al.*, 2020). Os autores realizaram análise experimental de cinco amostras de painéis sanduíches com PIR, variando apenas as espessuras: 30, 50, 100 e duas de 150 milímetros no ensaio de *Single Burning Item* (SBI).

Segundo os autores, quatro amostras foram classificadas com classe 2A para reação ao fogo conforme NBR 16626 (ABNT, 2017b) e uma como classe 3A. Desta forma, concluíram que houve influência da espessura da amostra nos resultados de SBI, porém não apresentaram variação não apresentou impacto significativo na reação ao fogo das amostras.

2.2.2.1 Regulamentação da Segurança Contra Incêndio no Brasil

A segurança contra incêndio no Brasil é regida pelas Instruções Técnicas (IT) elaboradas pelo Corpo de Bombeiros Militar de cada Estado. Dessa forma, cada Estado consegue adequar sua legislação conforme a respectiva necessidade, mas a grande maioria toma como referência as instruções técnicas do Corpo de Bombeiros Militar de São Paulo, por conta de seu refinamento e amplitude.

A IT 02/2019 (SÃO PAULO, 2019a), de forma introdutória, contextualiza a segurança contra incêndio no Brasil, conceitua o fenômeno incêndio e as medidas de proteção passivas e ativas. Dentre as medidas de proteção passivas, destacam-se a compartimentação vertical e horizontal, resistência ao fogo das estruturas e reação ao fogo dos materiais. A instrução técnica caracteriza a compartimentação como a principal medida a ser adotada visando a dividir o edifício em módulos capacitados a suportar a queima de materiais, a impedir o alastramento do incêndio e a salvaguardar

as rotas de fuga da edificação. De forma complementar, na Resolução Técnica 02 (RIO GRANDE DO SUL, 2014), a compartimentação deve evitar a propagação não apenas do fogo, mas também do calor e dos gases, interna ou externamente ao edifício.

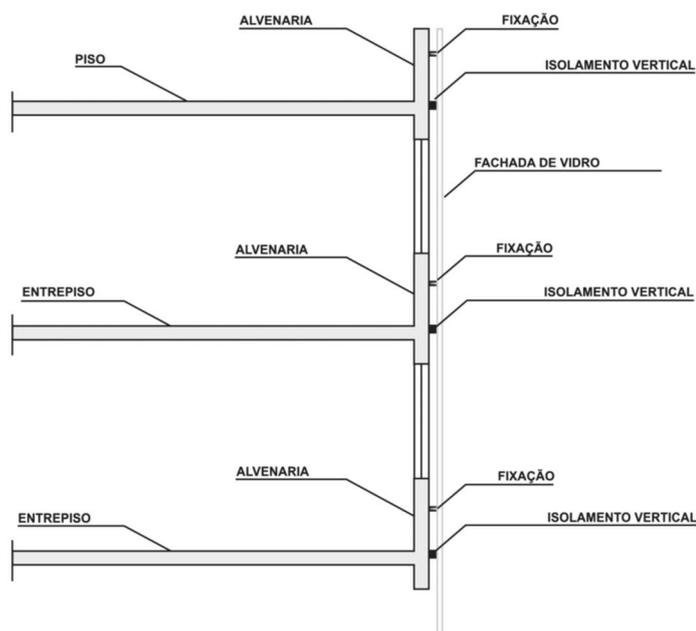
Conforme constante na IT 03/2019 (SÃO PAULO, 2019b), a compartimentação horizontal é caracterizada como medida de proteção constituída por elementos corta-fogo, separando ambientes e impedindo a propagação do incêndio no plano horizontal, enquanto a compartimentação vertical é medida de proteção constituída por elementos corta fogo, separando pavimentos consecutivos e impedindo a propagação do incêndio no plano vertical.

Especificamente no cenário do Estado do Rio Grande do Sul, consta em vigor a Resolução Técnica de Transição (RT) (RIO GRANDE DO SUL, 2022) que tem por finalidade fixar os requisitos mínimos exigidos nas edificações até a publicação das Resoluções Técnicas específicas. Sobre compartimentação, a RT cita ser medida obrigatória e aponta a IT 09/2019 (SÃO PAULO, 2019e) como norma a ser observada.

Conforme a Resolução Técnica de Transição do CBMRS (RIO GRANDE DO SUL, 2022), o isolamento de riscos nas fachadas deve ser empregado por meio de afastamentos entre as unidades ou por elementos que promovem a separação das áreas. Estes elementos de compartimentação vertical e horizontal devem possuir tempo de resistência ao fogo de duas e três horas, respectivamente, para risco baixo ou médio e risco alto, assim como diferentes dimensões. Em análise de isolamento de risco para fachadas, a IT n° 07/2019 CBMESP (SÃO PAULO, 2019c) não especifica casos para fachadas entre pavimentos de uma mesma edificação, apenas contíguas.

De forma específica para as situações de fachadas envidraçadas, a IT 09/2019 (SÃO PAULO, 2019e) indica a necessidade de utilização de dois tipos de barreiras para garantir a compartimentação vertical da fachada cortina: selos corta fogo em todo o perímetro como isolamento vertical e instalação de parapeitos de alvenaria ou vigas ou prolongamentos dos entrespisos, com função de impedir a propagação do incêndio após quebra dos vidros. Na Figura 5, consta ilustrada a indicação da instrução técnica.

Figura 5 – Compartimentação vertical em fachadas cortina



Fonte: São Paulo (2019e).

Apesar das exigências de segurança para adoção de fachadas envidraçadas, não se tem especificado o grau de eficiência do sistema apresentado, apenas os TRRF mínimos de cada elemento constituinte do sistema. São prescritos os elementos resistentes ao fogo (parapeitos ou prolongamentos) que estabelecem a compartimentação vertical.

A Instrução Técnica n° 08 do CBPMESP (SÃO PAULO, 2019d) e a NBR 15575 (2021a) são responsáveis por estabelecer os TRRF a serem atendidos pelos elementos estruturais e de compartimentação das edificações. Com relação aos elementos de compartimentação, a referida Instrução Técnica permite a execução de ensaios específicos para resistência ao fogo em laboratórios reconhecidos, de acordo com normas técnicas nacionais. Caso não se tenha norma nacional, serão aceitos ensaios realizados de acordo com as normas estrangeiras internacionalmente reconhecidas.

2.2.3 Meios de Propagação do Fogo nas Fachadas

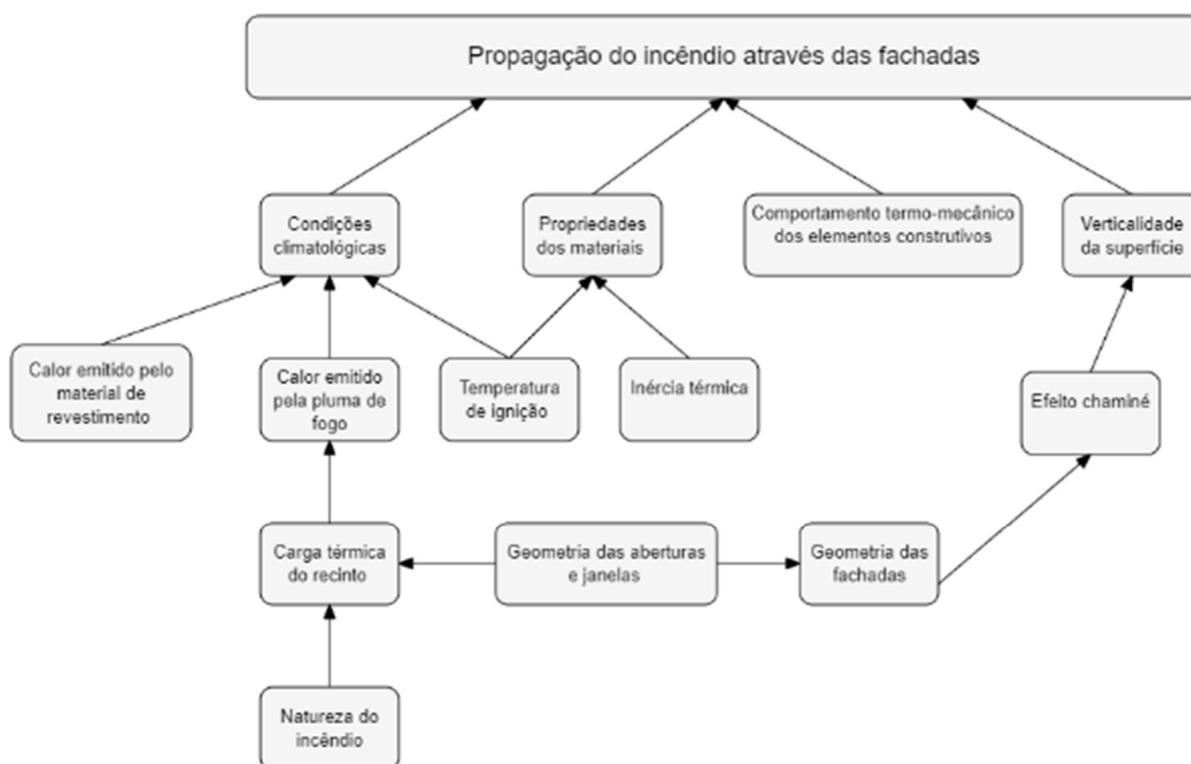
As fachadas das edificações possuem três principais ameaças de incêndio: a propagação do fogo do interior da edificação por meio de janelas, aberturas, materiais combustíveis acumulados próximos à fachada (veículos em chamas, lixo...), e de

imóveis adjacentes, seja através das chamas ou fluxo de calor (KONECKI; GAŁAJ, 2017; OLESZKIEWICZ, 1990). Sendo que a primeira situação pode ser considerada como a mais severa e frequente, por conta da incidência direta das chamas na face externa da fachada (OLESZKIEWICZ, 1990),

As fachadas podem ser uma das vias mais rápidas de propagação do incêndio em uma edificação, constituindo uma potencial rota de alastramento do fogo para os pavimentos superiores, favorecido pela convergência de fatores: oxigênio em abundância, a verticalidade do meio de propagação, vento e outras condições atmosféricas (GIRALDO FORERO, 2019).

Segundo a autora, o tamanho, intensidade e duração da propagação através das janelas de um recinto depende principalmente de fatores como: carga de incêndio, tamanho do recinto, geometria da janela e condições de ventilação. Os fatores climatológicos, tais como temperatura, pressão, umidade relativa do ar e o vento podem também influenciar na propagação do fogo. Na Figura 6, consta a ordem dos fatores que influenciam na propagação do incêndio através das fachadas.

Figura 6 – Fatores que influenciam na propagação do fogo nas fachadas

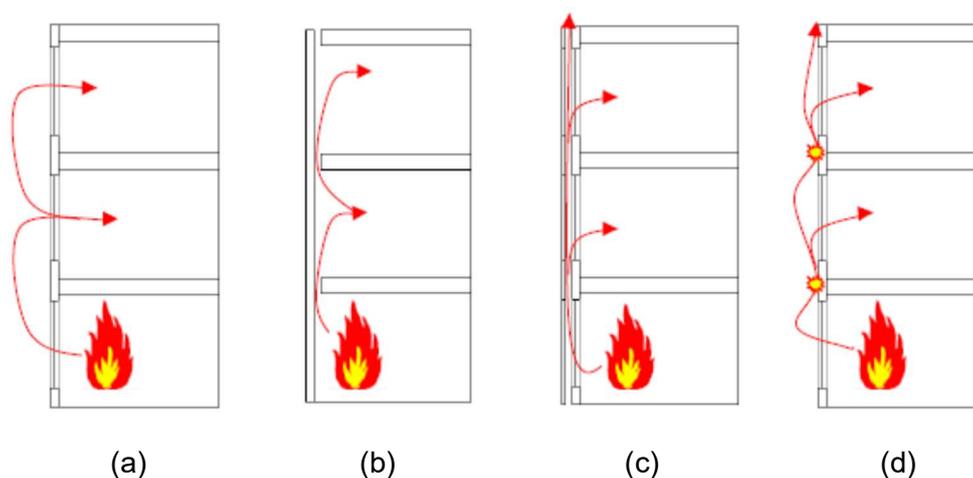


Fonte: Giraldo Forero (2019, p. 32).

Segundo Giraldo Forero (2012), a propagação do fogo através das fachadas pode ocorrer por quatro principais causas, esteja ela ocorrendo de forma independente ou combinação de duas ou mais. Assim, se estabelecem:

- a) efeito “*leap frog*”, caracterizado pela propagação das chamas pelas janelas;
- b) propagação pelo vão entre laje de piso e fachada;
- c) propagação através das câmaras ventiladas;
- d) propagação através dos revestimentos combustíveis, conforme ilustradas na Figura 7.

Figura 7 – Principais causas de propagação dos incêndios em fachadas



Fonte: Giraldo Forero (2012, f. 191).

Devido ao desenvolvimento de novos conceitos de construções sustentáveis, estão se desenvolvendo materiais que possam contribuir com a eficiência energética para serem utilizados nas fachadas das edificações. Entretanto, sem o real conhecimento do comportamento do material quando exposto ao fogo, pode-se causar um severo aumento no risco aos usuários da edificação, visto que, quando em chamas, não se tem uma forma de extinção do incêndio nas fachadas por *sprinklers* ou outro sistema de proteção ativa (NGUYEN *et al.*, 2016).

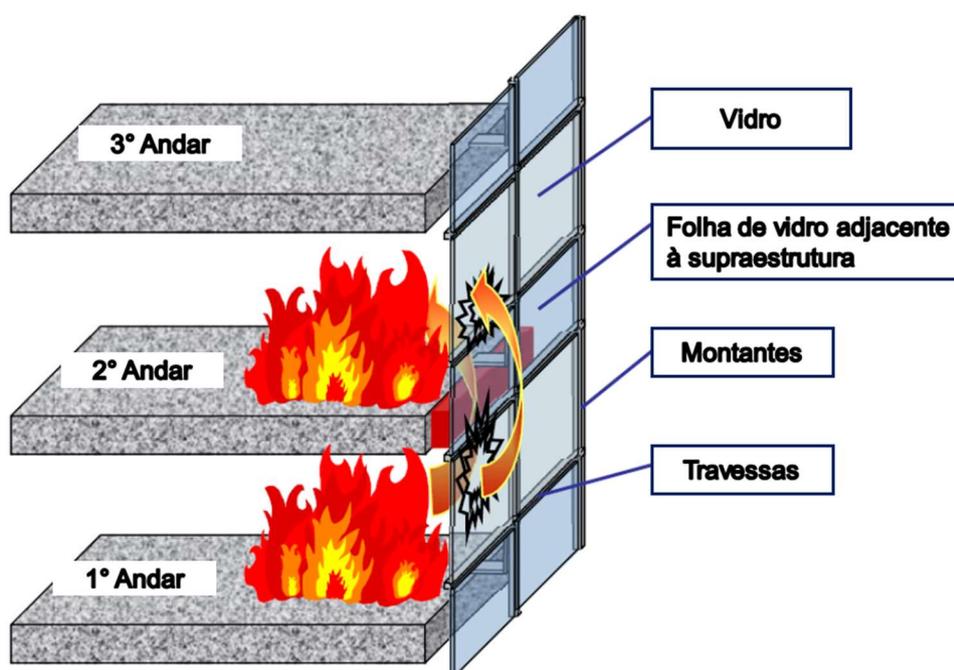
Dentre os materiais que se enquadram no conceito de construções sustentáveis, tem-se as fachadas cortina, ou fachadas envidraçadas, pois aproveitam a luz solar para promover a iluminação dos ambientes (NGUYEN *et al.*, 2016). Entretanto, torna-se o sistema mais frágil da edificação quando exposta ao fogo, por conta da propriedade quebradiça do vidro, propenso a quebrar e rachar sem aviso prévio (NGUYEN *et al.*, 2016; WANG, Y. *et al.*, 2017). A propagação através de

aberturas na fachada, como janelas, pode ser considerada como um dos mecanismos de maior periculosidade para edifícios altos (OLESZKIEWICZ, 1989).

O efeito *leap frog*, também denominado “salto de chama”, é a capacidade de o incêndio se propagar de forma ascendente, através das aberturas da fachada da edificação e com intensas chamas e calor, capazes de quebrar os vidros das janelas dos pavimentos superiores e propagar o incêndio para estes (GIRALDO FORERO, 2012). Este fenômeno é ilustrado na Figura 8 do presente trabalho.

O *leap frog* se tornou um risco ainda mais severo ao se analisar a segurança contra incêndio nas edificações altas (GUNASEKARAN; PREMALATHA; MALINI, 2010). Os autores defendem que existem duas formas de impedir que este fenômeno ocorra: apoiar o sistema da fachada diretamente na estrutura do edifício e transpassar a fachada com a laje; e, para situações em que a fachada é externa à estrutura, é necessário utilizar sistemas de proteção periféricos com selos corta fogo no encontro da laje com o sistema de fachada.

Figura 8 – Efeito *leap frog*



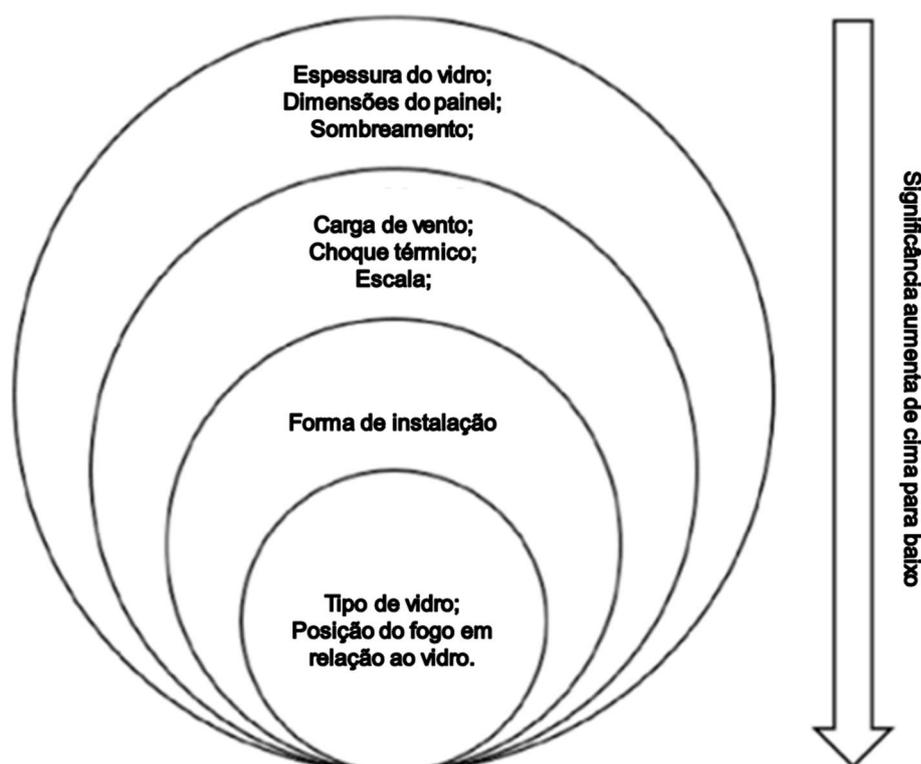
Fonte: Adaptado de Toma (2012, p. 8).

A quebra do vidro na fachada envidraçada resulta na perda da integridade do sistema, gerando um canal de entrada de oxigênio para dentro da edificação e possibilitando que as chamas alcancem o lado externo da fachada e pavimentos superiores (WANG, Y. *et al.*, 2014, 2017). A abertura e a conseqüente propagação de

forma ascendente e sequencial do fogo pelos pavimentos superiores da edificação é um efeito do *leap frog* e que pode causar o rompimento dos vidros dos pavimentos superiores e possível propagação para a área interna (GIRALDO FORERO, 2012).

Em uma fachada envidraçada, tem-se a necessidade de entender quais os principais fatores que influenciam na quebra do vidro quando da ocorrência de um incêndio. Através da comparação feita por três métodos distintos, os principais fatores que interferem na quebra do vidro são: tipo do vidro, distância do fogo com relação ao vidro e a forma de fixação (WANG, Y. *et al.*, 2018). Com base na análise de dezesseis diferentes variáveis identificadas como influentes na quebra do vidro quando exposto ao fogo, os autores puderam estabelecer a ordem constante na Figura 9.

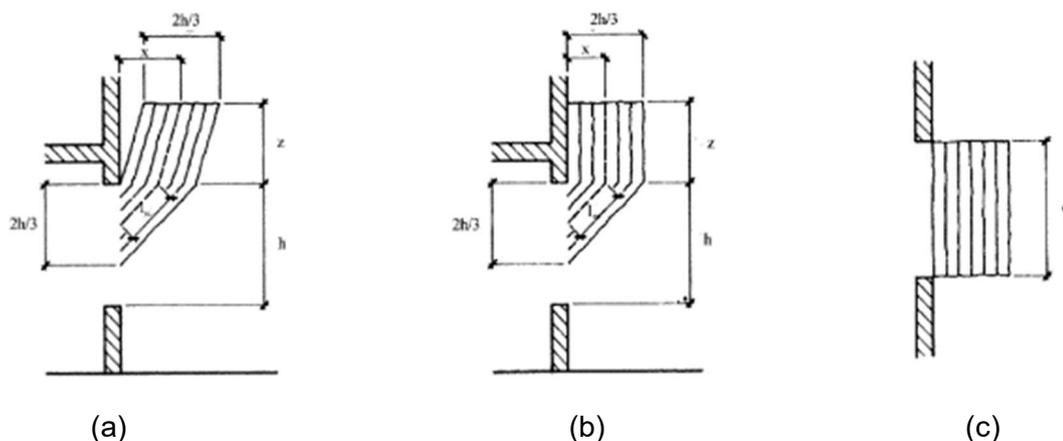
Figura 9 – Ordem de importância dos fatores na quebra do vidro



Fonte: Adaptado de Wang, Y. *et al.* (2018)

Com relação ao *leap frog*, tem-se o Modelo de Law, que apresenta cenários de geometria simples, com ângulos retos, considerando a largura da abertura, a altura e a profundidade do recinto e a altura da abertura, conforme ilustrado na Figura 10 (LAW, 1978).

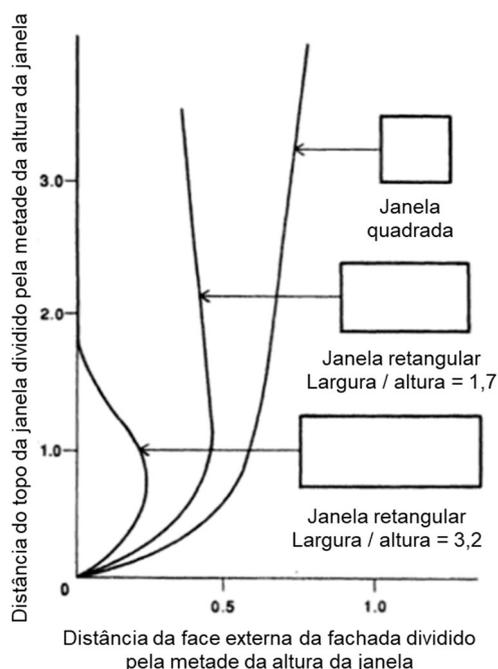
Figura 10 – Trajetória das chamas em condições de fluxo natural (a) $h > 1,25w$ ou sem muro acima da janela; (b) $h < 1,25w$ com muro acima da janela; (c) vista em planta das chamas



Fonte: Law (1978)

O formato do prédio, a geometria da janela e as condições externas são determinantes para a ocorrência da propagação do incêndio pelo meio externo da edificação (PATTERSON, 1993). Conforme o autor, o impacto do formato da janela na forma em que o fogo se propaga externamente em uma edificação de fachada “sólida” pode ser ilustrado pela Figura 11.

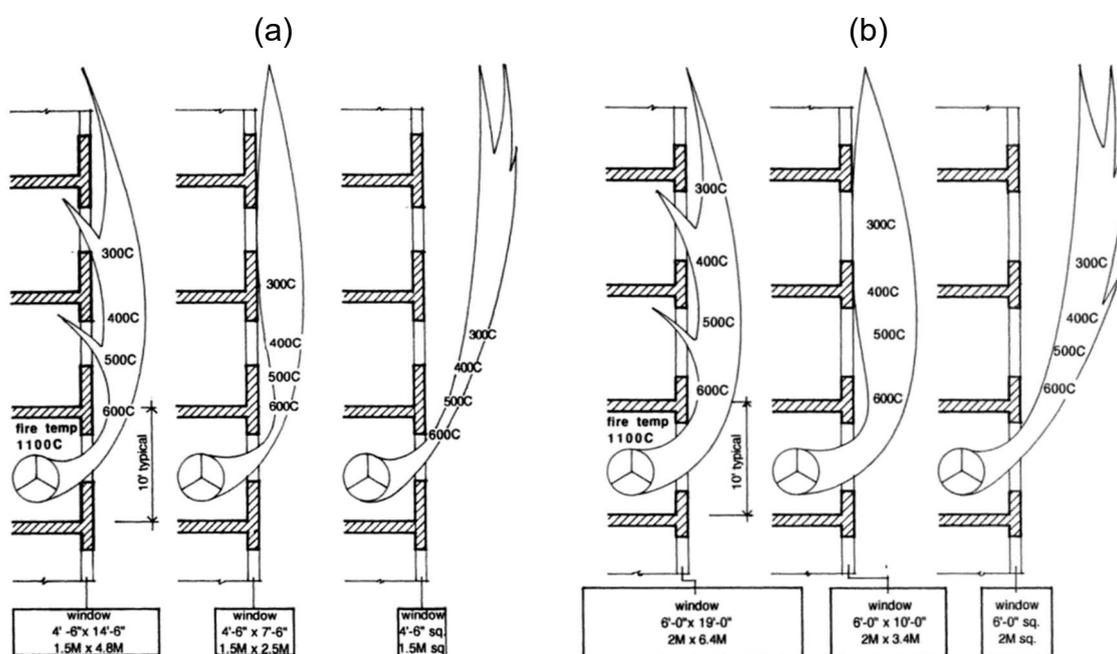
Figura 11 – Trajetória da chama com diferentes formatos de janelas



Fonte: Adaptado de Patterson (1993).

Segundo Patterson (1993), a Figura 12 ilustra a projeção das chamas através de uma janela, com o fogo interno do ambiente de 1.100°C , fazendo a comparação de duas diferentes alturas de janela: 1,50 metro e 2,0 metros. É possível visualizar que a janela com maior dimensão horizontal, em ambos os casos, foi a pior situação. Conforme o autor, embora a janela quadrada tenha demonstrado melhor trajetória das chamas, elas ainda se encontram a aproximadamente 0,50 metro da fachada no pavimento superior e com temperaturas próximas a 500°C , o que poderia ocasionar a ignição de materiais combustíveis posicionados próximos à janela.

Figura 12 – Perfil das chamas projetadas em janelas com (a) 1,5 metro de altura e (b) 2,0 metros de altura



Fonte: Adaptado de Patterson (1993)

O impacto da geometria na janela da chama que sai pela janela foi constatado também por Rodrigues (2009), que concluiu que as janelas mais estreitas e com dimensões de altura e largura semelhantes ocasionam afastamento maior das chamas aquecidas da fachada. Diferentemente das aberturas com larguras consideravelmente maiores que a altura, que projetam as chamas rentes à fachada externa.

Através de modelos de simulações computacionais, comparando uma mesma estrutura com dois pavimentos, com uma mesma fonte de calor (capacidade máxima de 3.500 KW), alterando as dimensões da janela (sendo o grupo n°1 com janelas de

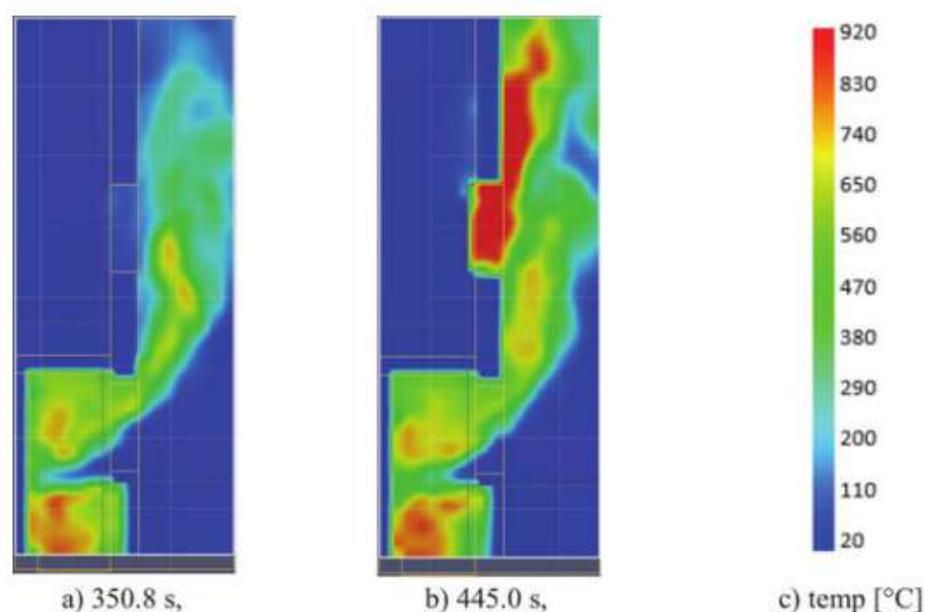
largura de 1,20 e variando a altura, grupo n° 2 com janelas com largura de 1,50 metro e variando a altura e o grupo n° 3 com largura de 1,20 e altura até o topo do pé direito) e alterando a altura do pé direito do ambiente (2,75 metros, 3,25 metros e 3,75 metros), conclui-se que quanto menor a janela, maior a chance de ocorrência do *leap frog* (SCHABOWICZ *et al.*, 2022). Na Tabela 1, consta o resumo das simulações realizadas pelos autores.

Tabela 1 – Dimensão das janelas e pé direito dos modelos ensaiados

Grupo n°	Modelo n°	Pé direito (m)	Dimensão das janelas (l x h)	Distância entre janelas (m)
1	1	2,75	1,20 x 1,20 m	1,55
	2	3,25	1,20 x 1,20 m	2,05
	3	3,75	1,20 x 1,20 m	2,55
2	4	2,75	1,50 x 1,50 m	1,25
	5	3,25	1,50 x 1,50 m	1,75
	6	3,75	1,50 x 1,50 m	2,25
3	7	2,75	1,20 x 1,35 (até o teto)	1,4
	8	3,25	1,20 x 1,85 (até o teto)	1,4
	9	3,75	1,20 x 2,35 (até o teto)	1,4

Fonte: Adaptado de Schabowicz *et al.* (2022, p. 96).

Segundo os autores, conforme ilustrado na Figura 13, é possível identificar o comportamento típico do fogo em uma fachada com janelas pequenas. Pode-se visualizar que, aos 350,8 segundos (aproximadamente 6 minutos), a temperatura na janela do pavimento superior atingiu 500°C, o suficiente para quebrar os vidros e, posteriormente, ignizar a cortina, como foi possível identificar aos 445 segundos de simulação.

Figura 13 – Desenvolvimento do fogo no modelo n° 1 do estudo de Schabowicz *et al.*

Fonte: Schabowicz *et al.* (2022, p. 102).

Dentre os resultados obtidos por Schabowicz *et al.* (2022), as simulações contaram com um elemento semelhante a uma cortina, a fim de identificar se ocorreria a ignição do material, que estaria por dentro da janela do pavimento superior. Assim, conforme resumido na Tabela 2, tem-se que a maior temperatura na janela do segundo pavimento e ignição da cortina em menor tempo foi no modelo de número 1, enquanto que, nos modelos 8 e 9, não se alcançou a ignição da cortina no segundo pavimento.

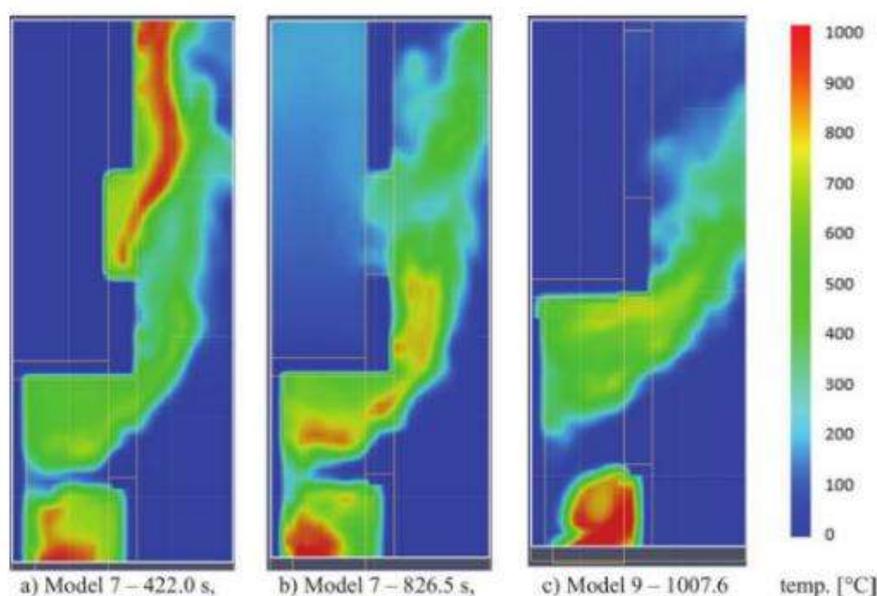
Tabela 2 – Resumo dos resultados

Grupo n°	Modelo n°	Temperatura máxima na janela do segundo pavimento (°C)	Ignição da cortina	Tempo ignição cortina (min)
1	1	850	Sim	6,31
	2	820	Sim	7,02
	3	820	Sim	6,90
2	4	700	Sim	7,03
	5	750	Sim	8,63
	6	820	Sim	9,29
3	7	810	Sim	6,23
	8	220	Não	0,00
	9	150	Não	0,00

Fonte: Adaptado de Schabowicz *et al.* (2022, p. 96).

Desta forma, os autores concluíram que o formato da janela foi o fator mais influente para a ocorrência do efeito *leapfrogging*, enquanto que a altura do pé direito não teve tanto impacto para janelas menores. Entretanto, com o aumento da janela, foi possível identificar que o aumento do pé direito influenciou na forma em que o fogo se desenvolveu na fachada, conforme Figura 14 (SCHABOWICZ *et al.*, 2022).

Figura 14 – Desenvolvimento do fogo para os modelos 7 e 9 do Quadro 6

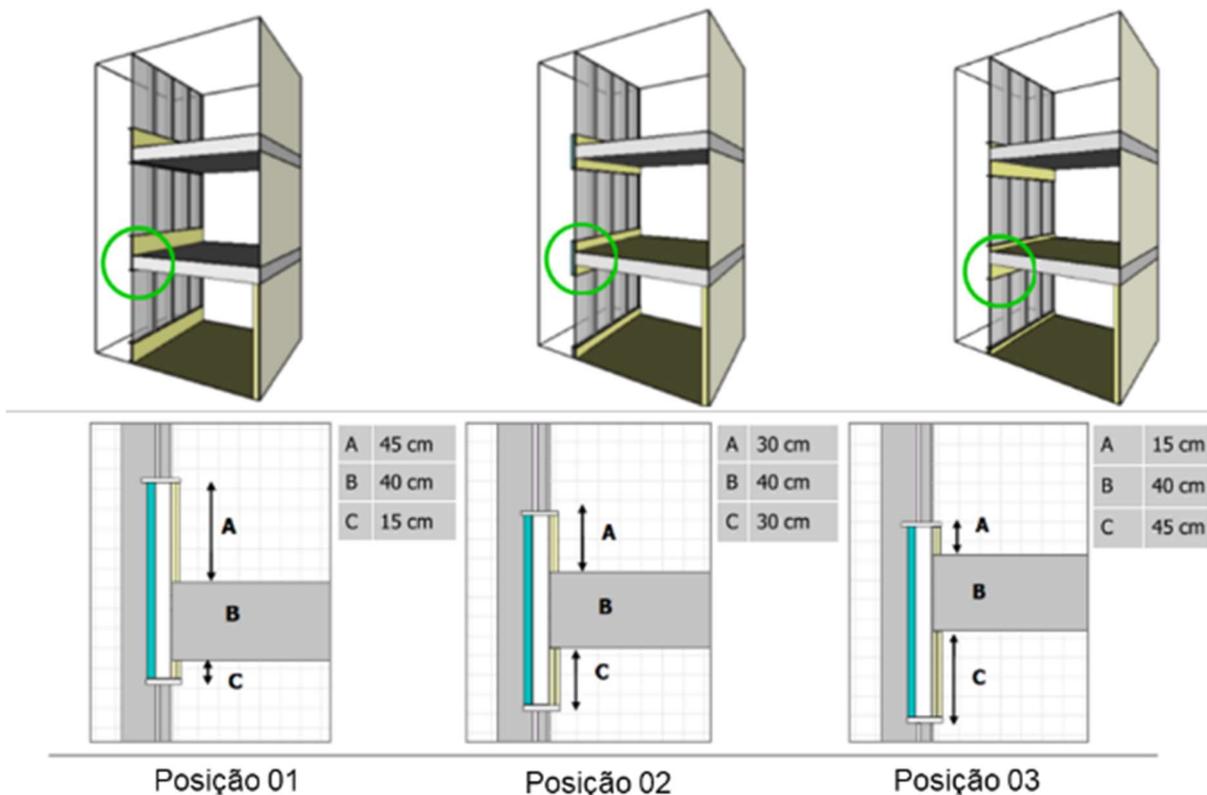


Fonte: Schabowicz *et al.* (2022, p. 103).

Através do uso do FDS (*Fire Dynamics Simulator*), foi possível simular cenários com propagação do fogo através de diferentes sistemas de fachadas e variações de elementos (GIRALDO FORERO, 2012). A autora considerou uma edificação com três pavimentos, com dimensão total de 4,90 x 4,00 metros, variando a configuração geométrica da fachada, elementos construtivos e fatores climáticos, possibilitando analisar diferentes aspectos, tais como: o desenvolvimento do fogo, trajetória, forma, altura das chamas, velocidade de propagação e intensidade do fluxo de calor.

Em fachadas cortinas envidraçadas, a autora simula três diferentes posicionamentos dos sistemas de compartimentação vertical, todos com altura de um metro, conforme Figura 15.

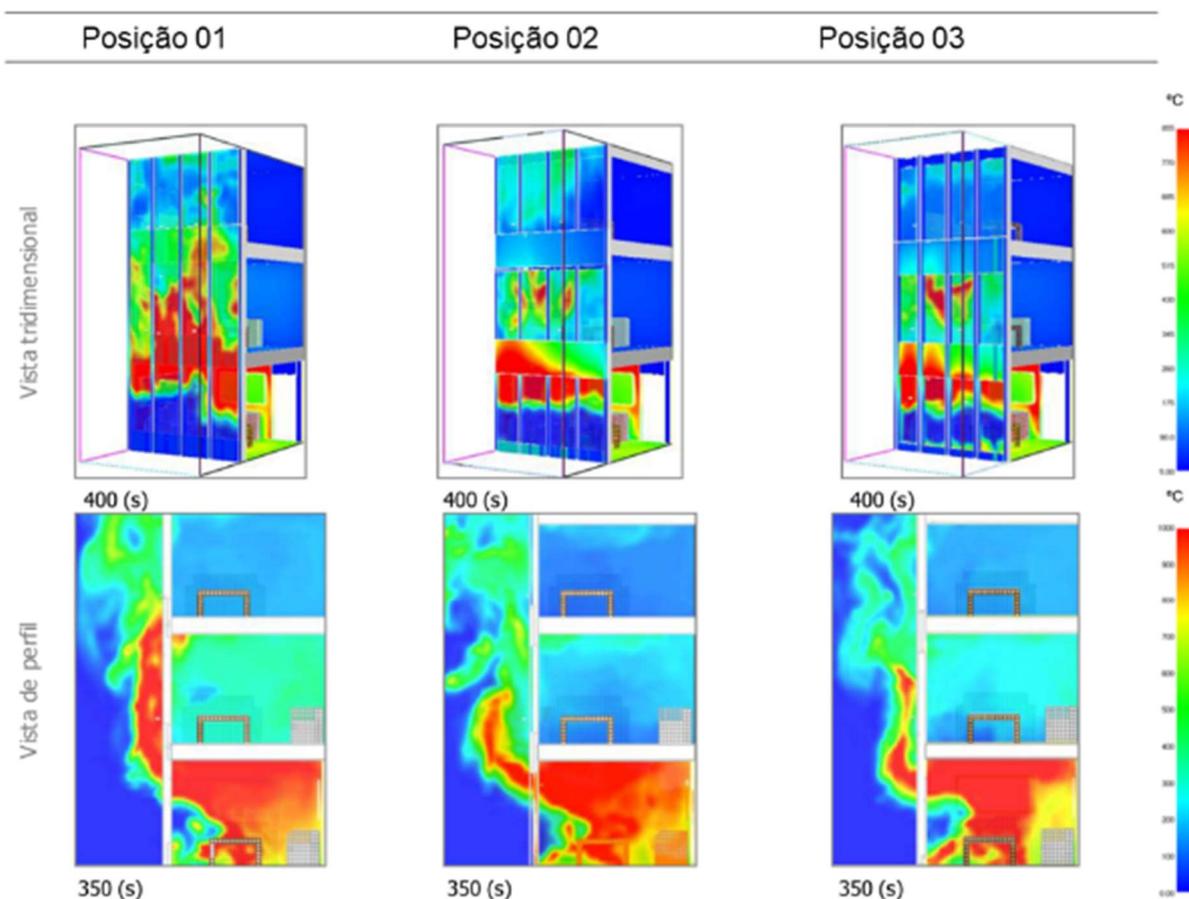
Figura 15 – Diferentes posicionamentos dos sistemas de compartimentação vertical



Fonte: Adaptado de Giraldo Forero (2012, p. 299).

Com relação ao *leap frogging*, foi possível identificar que as chamas oriundas da janela do primeiro pavimento, nas posições 02 e 03, tiveram uma trajetória mais curvilínea, distanciando-se da fachada e incidindo sobre as janelas quando do seu retorno para junto da superfície da edificação. Com relação às temperaturas atingidas na parte interna da janela do segundo pavimento, tem-se que na posição 01 atingiu 800°C, enquanto que nas posições 02 e 03 não superou 400°C. Esta diferença de temperatura indica que a variação no posicionamento do sistema pode alterar levemente o alcance da propagação, visto que a probabilidade de que o fogo se espalhe para os pavimentos superiores segue grande com alturas de 1 metro para as barreiras perimetrais (GIRALDO FORERO, 2012). Os resultados podem ser visualizados na Figura 16.

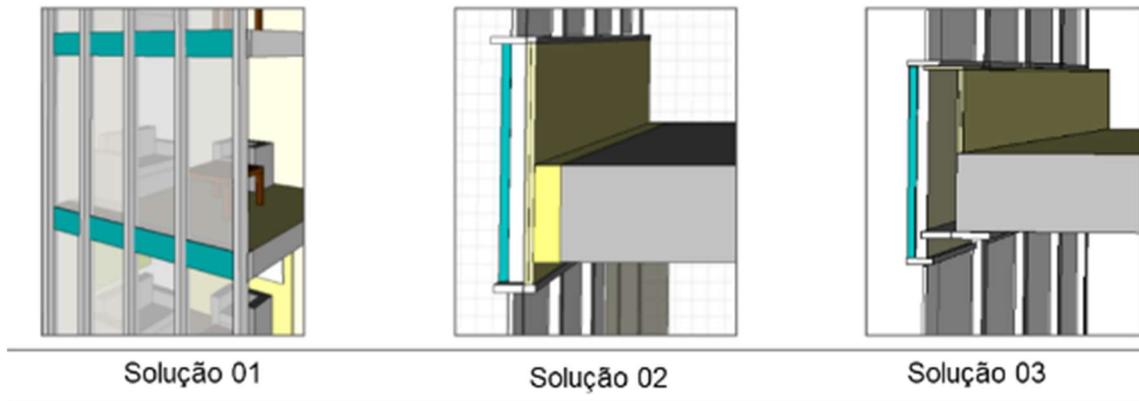
Figura 16 – Resultados das simulações computacionais propostas



Fonte: Adaptado de Giraldo Forero (2012, p. 362).

Além da altura da barreira perimetral, outro ponto importante e crítico para o bom desempenho do sistema compartimentação vertical em uma fachada cortina durante uma situação de incêndio é a sua forma de fixação. Giraldo Forero (2012) realizou a análise de três sistemas: sem anteparo vertical de um metro (solução 01), outro com selagem e anteparo vertical de um metro fixados na estrutura da edificação (solução 02) e outro com selagem e anteparo vertical de um metro fixados no sistema da fachada (solução 03), conforme ilustrado na Figura 17.

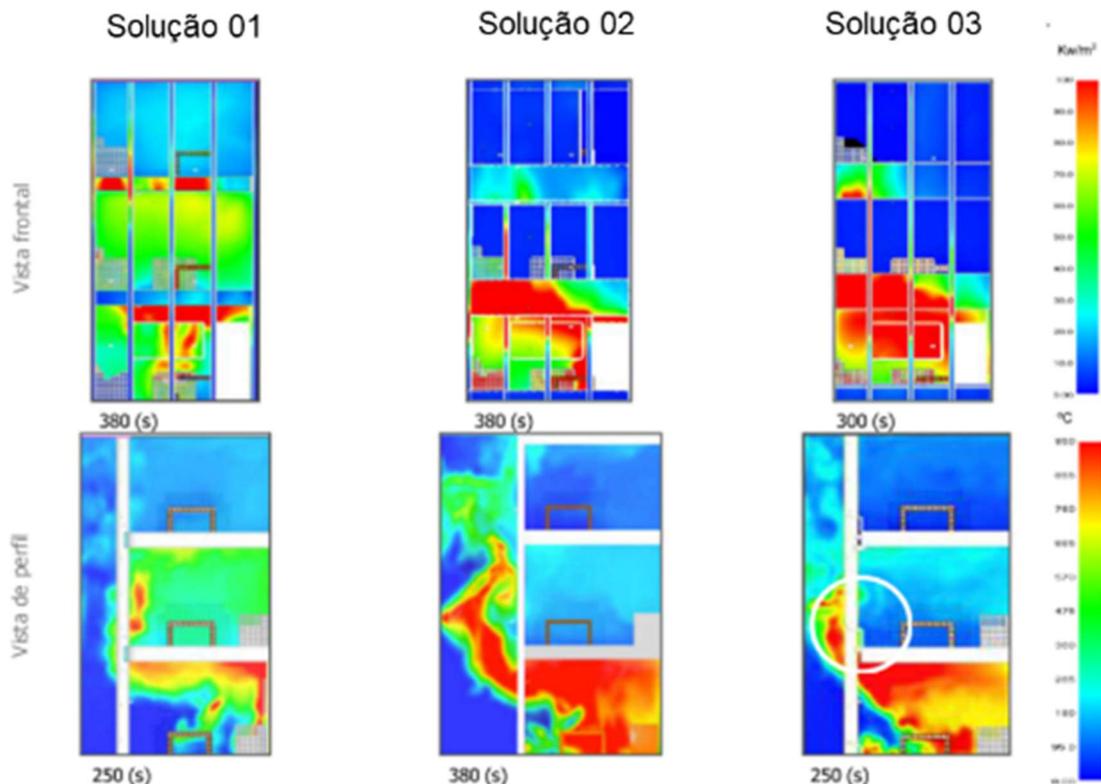
Figura 17 – Selagem perimetral e anteparo vertical (soluções 01, 02 e 03)



Fonte: Adaptado de Giraldo Forero (2012, p. 395).

Através da análise da simulação computacional realizada, a solução 01 apresentou rápida propagação do fogo para o pavimento superior. Nas soluções 02 e 03 se observa que as chamas saem pela janela e ganham um formato curvilíneo e incidem novamente na fachada, porém a penetração do fogo para os pavimentos superiores é menos agressiva e mais lenta do que quando comparada com a solução 01, conforme ilustrado na Figura 18 (GIRALDO FORERO, 2012).

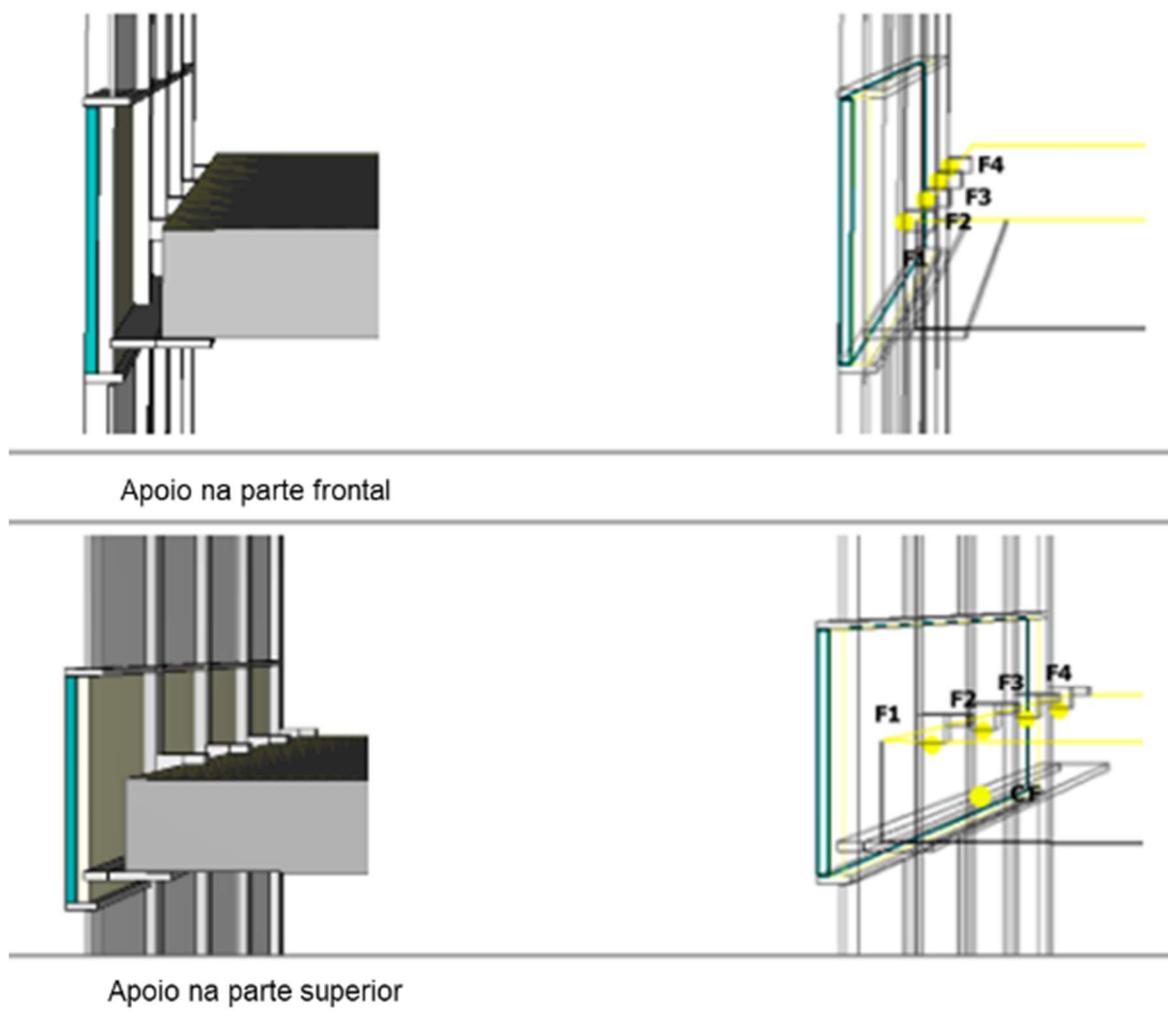
Figura 18 – Simulações computacionais das soluções 01, 02 e 03



Fonte: Adaptado de Giraldo Forero (2012, p. 395).

Ainda, de forma complementar, a autora simulou na solução 03 a possibilidade de falha da selagem, considerando uma abertura de três centímetros junto a um dos perfis metálicos quando a temperatura alcançasse 700°C, e variou a fixação dos sistemas de fachada cortina: apoiada sobre a estrutura e na parte frontal da estrutura, conforme Figura 19.

Figura 19 – Tipos de fixação da fachada simulados na Solução 02



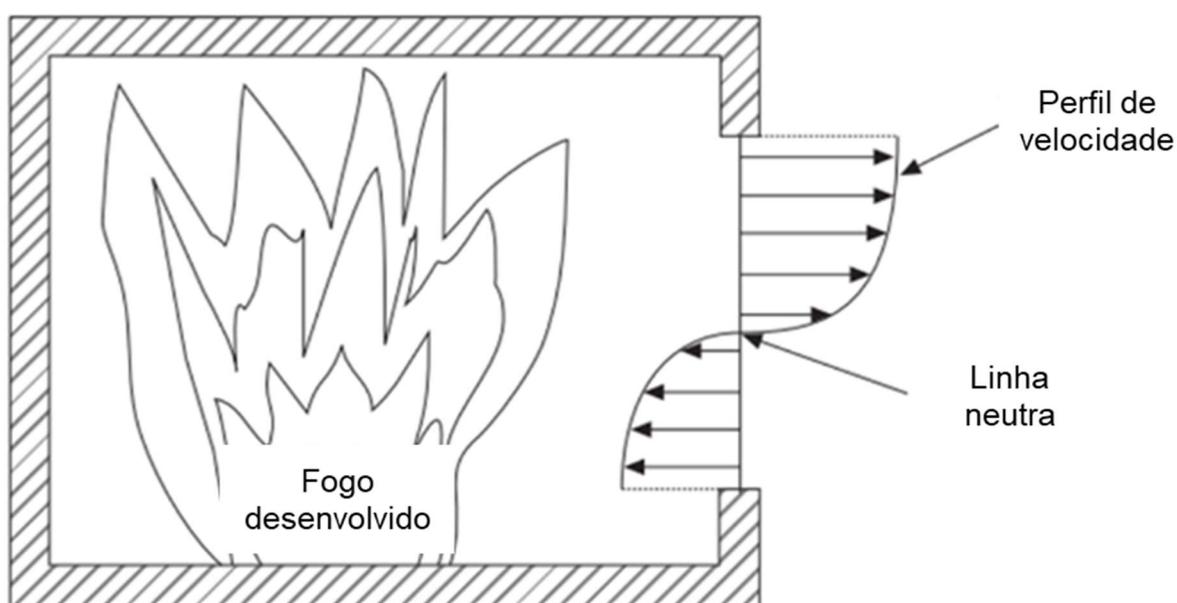
Fonte: Adaptado de Giraldo Forero (2012, p. 398).

Observou-se que as temperaturas dos apoios frontais atingiram temperaturas próximas a 750°C, enquanto que nos apoios sobre a estrutura, temperaturas próximas a 650°C. Concluiu-se então que, apesar da diferença de temperatura não ser considerada tão grande, os sistemas de apoios frontais tendem a ficar mais expostos ao calor, caso haja falha no sistema de selagem, tendo um maior risco de colapso da estrutura (GIRALDO FORERO, 2012).

Segundo Emmons (1986), aberturas em situações de incêndio são um problema em especial, possibilitando a saída de gases quentes e a entrada de oxigênio. Por conta da baixa resistência ao incêndio oferecida pelo sistema de fachada envidraçada, o sistema pode facilmente ficar comprometido por conta da quebra do vidro, abrindo passagem para que o fogo acesse a parte externa da edificação e acelerando a propagação (WANG, B. *et al.*, 2016a).

Quando da existência de uma abertura na fachada e que providencia o abastecimento de oxigênio, principalmente após o *flashover*, momento no qual o incêndio passa a ser controlado pela quantidade de oxigênio existente no ambiente, surgem dois fluxos na janela: saindo ar quente e chamas na parte superior da abertura e entrando oxigênio do meio externo pela parte inferior da janela, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Fluxo de ar quente e oxigênio na janela



Fonte: Adaptado de Buchanan (2001)

Existem dois tipos principais de fachadas que proporcionam a existência de uma cavidade: o vão dentro do elemento de revestimento (entre camadas) e o vão entre a estrutura da edificação e o sistema de fachada (NGUYEN *et al.*, 2016). Na primeira situação, diversos estudos já foram realizados para a análise da transferência de fumaça e calor por entre essa abertura, e o pior cenário identificado foi quando ocorre uma quebra da camada interna do revestimento e permanece a externa,

mantendo todo o calor e fumaça presos na edificação, porém atingindo os demais pavimentos (CHOW, L., 2014; CHOW, W. *et al.*, 2007; JI *et al.*, 2016).

Conforme analisado por Srivastava, Nakrani e Ghoroi (2020), em uma situação em que o fogo se inicia por uma fonte externa à edificação, ele tende a se espalhar de forma mais rápida e agressiva, alcançando temperaturas mais elevadas e pavimentos mais altos em menos tempo quando comparada a uma situação em que a origem do incêndio se encontra interna à edificação. Ainda segundo os autores, no incêndio em que a fonte de origem se encontra interna à edificação, foi concluído que a falta de oxigenação do ambiente proporcionou um desenvolvimento do incêndio de forma mais lenta. Entretanto, em ambas as situações, houve o colapso dos painéis de vidro da fachada e inflamação do revestimento da fachada ensaiada.

Como resultados do ensaio proposto pelos autores, em ambas as situações foi possível analisar que o tempo que o usuário tem para fuga, após a inflamação do sistema da fachada, é de aproximados cinco minutos até que a temperatura interna do cômodo atinja trezentos graus Celsius. Em ambas, o efeito *leap frog* foi o principal mecanismo de propagação do incêndio a partir do momento em que houve a queda dos painéis de vidro.

Outra forma de propagação de fogo é entre dois prédios, quando um deles está em chamas. A propagação entre dois prédios pode ocorrer através de quatro diferentes formas (CARLSSON, 1999). A primeira é através das cinzas quentes emitidas de uma edificação em chamas, que podem viajar por grandes distâncias. Quando a construção vizinha tiver materiais incombustíveis em sua fachada, a propagação através das cinzas quentes pode ser ignorada (BARNETT, 1989). Entretanto, pode servir de fonte de ignição quando combinada com a radiação capaz de quebrar algum vidro e possibilitar a entrada das cinzas quentes em um cômodo do prédio adjacente ao fogo (BARNETT, 1989; CARLSSON, 1999).

A propagação ainda pode ocorrer através das chamas que saem de uma abertura na fachada do prédio em chamas e atingir o prédio vizinho. Entretanto, esta forma de propagação depende das dimensões da chama projetada e distância entre edificações. Segundo Barnett (1989), sem considerar a influência do vento, as chamas vão projetar para fora do prédio distâncias variando entre metade da altura da janela (para aberturas longas) até 1,5 vez para uma janela quadrada.

A terceira forma é pela convecção de gases quentes emitidos de um prédio em chamas, que podem atingir centenas de graus Celsius, e entrar em contato direto com

a fachada da edificação vizinha. Entretanto, esta última forma de propagação exige que a distância entre as duas construções seja pequena (CARLSSON, 1999).

A quarta forma de propagação é a mais comum, segundo Carlsson (1999), é através da radiação. Pode acontecer a distâncias bem superiores do que a de contato direto das chamas e gases quentes. Valores típicos em que pode ocorrer a ignição da madeira são $33,5 \text{ kW/m}^2$ para ignição espontânea e $12,5 \text{ kW/m}^2$ para ignição na presença de uma fonte, tal como cinza ou faísca, quando preaquecida.

Conforme Barnett (1989), quando uma edificação recebe calor por radiação, os materiais suscetíveis à ignição são tanto os constantes na fachada como os internos aos ambientes junto à fachada exposta. Segundo o autor, para evitar a ignição pela radiação incidente, deve-se estabelecer limites de projeto considerando se a ignição ocorrer de forma espontânea ou com a presença de alguma fonte.

Assim, segundo o autor, quando a fachada do edifício adjacente for feita de material combustível, a ignição não ocorreria de forma espontânea, o valor limite de radiação incidente seria de $12,5 \text{ kW/m}^2$. O mesmo valor poderia ser atribuído a situações em que a fachada é incombustível, mas o vidro utilizado para fechamento é comum, pois facilmente quebraria e possibilitaria a entrada de cinzas quentes que poderiam dar início à ignição. Enquanto que para vidros resistentes ao fogo, que não quebrem ou caiam durante o tempo projetado, pode-se atribuir o valor limite para ignição espontânea de materiais no interior do ambiente em 25 kW/m^2 e, em situações que o vidro ainda tiver a capacidade de redução de radiação, pode-se aumentar ainda mais a radiação externa incidente.

Através da simulação computacional com o software *Fire Dynamics Simulator*, os autores Pesic *et al.* (2017) testaram distâncias de 3.5, 4.0 e 4.5 metros entre duas edificações, a fim de estimar a distância ótima de segurança para fins de evitar a propagação do fogo entre as edificações. Tanto na simulação de 3.5 e na de 4.0 metros, a cortina de algodão posicionada na edificação adjacente ignizou por conta da intensa radiação emitida pelo fogo, sendo que o limite de radiação para o algodão é de 10 kW/m^2 .

Com relação às fachadas das edificações, tem-se uma preocupação internacional com o desempenho dos sistemas de fachadas em situações de incêndio. Diferentes países adotam formas de avaliar o comportamento dos sistemas que compõem as fachadas das edificações, principalmente pela utilização de materiais combustíveis com o objetivo de melhorar o isolamento térmico da construção

(CANCELLIERE *et al.*, 2021). Assim, tem-se o Quadro 5 que exemplifica algumas das metodologias de ensaio de segurança contra incêndio em fachadas, as quais possuem amostras de diferentes escalas e utilizam materiais combustíveis variados, demonstrando a variabilidade.

Quadro 5 – Ensaio de segurança contra incêndio em fachadas

Normas	Países de aplicação	Combustível	Escala
DIN 4102-20	Suíça e Alemanha	Berço de madeira e queimador a gás	Média
BS 8414 series	Reino Unido e Irlanda	Berço de madeira	Grande
PN-B-02867	Polônia	Berço de madeira	Média
<i>Engineering Guidance</i> 16	Finlândia	Madeira	Grande
ISO 13785-1	República Tcheca	Queimador a gás	Média
ISO 13785-2	Eslováquia	Propano, heptano e berço de madeira	Grande
LEPIR 2	França	Berço de madeira	Grande
MSZ 14800-6	Hungria	Berço de madeira	Grande
SP Fire 105	Suécia, Noruega e Dinamarca	Heptano	Grande
<i>Technical regulation A</i> 2.2.1.5	Alemanha	Berço de madeira	Grande
ONORM B 3800-5	Suíça e Áustria	Berço de madeira	Média
NFPA 285	Estados Unidos	Queimador a gás interno e externo	Grande
CAN/ULC	Canadá	Queimador com propano	Grande
FM 4880	Estados Unidos	Berço de madeira	Grande
ASTM E2307	EUA	Queimador a gás interno e externo	Grande
ASTM E2874	EUA	Queimador a gás interno e externo	Grande

Fonte: Adaptado de Cancelliere *et al.* (2021, p. 626)

2.3 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM SISTEMAS DE FACHADAS ENVIDRAÇADAS

A fachada de uma edificação é um sistema que pode agravar um incêndio por possibilitar o caminho para propagar as chamas para pavimentos superiores ou como fonte de calor para construções adjacentes (OLESZKIEWICZ, 1990). A propagação do fogo entre pavimentos através da fachada da edificação é objeto de estudo de diversos trabalhos, com aplicação de diferentes métodos de análise para estudar diferentes sistemas de fachada, materiais e geometrias (ANDERSON *et al.*, 2017).

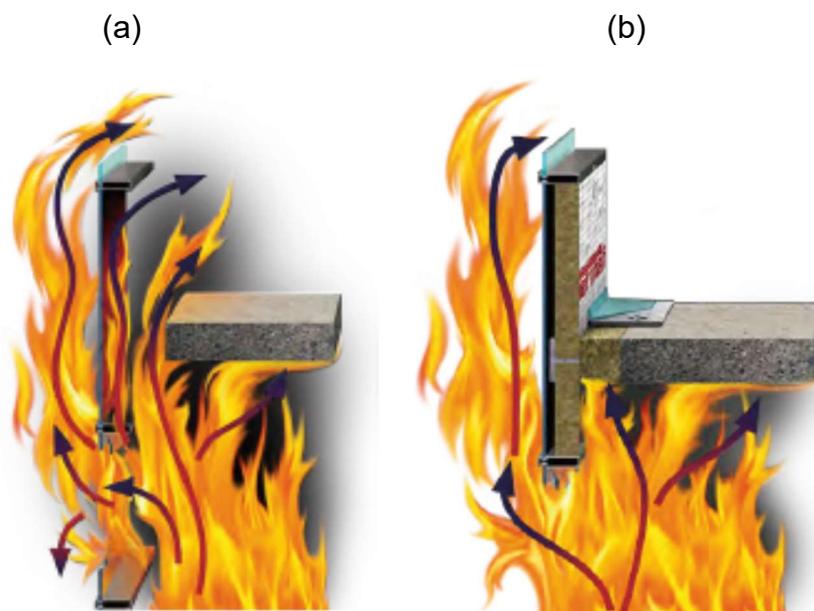
Através da análise de dados desde 1990 até 2018, a frequência de casos de incêndio em fachadas de grandes prédios aumentou em sete vezes através do mundo, atingindo uma taxa atual de 4,8 incêndios por ano (BONNER; REIN, 2018). Segundo os autores, a principal ameaça para uma edificação em situação de incêndio é a quebra da compartimentação, tanto horizontal quanto vertical, intensificadas pelo aumento da altura das edificações modernas.

As fachadas pele de vidro são sistemas que devem ser projetados e construídos de forma que, em caso de incêndio, limitem a propagação das chamas internas da edificação, garantindo a segurança e evacuação dos usuários na incidência de um sinistro (KINOWSKI; SEDLAK; SULIK, 2016).

O encontro entre o sistema de fachada com a estrutura da edificação é um ponto crítico na segurança contra incêndio, principalmente quando utilizadas as fachadas cortina, por depender de uma execução complexa e sem margem para erros e com materiais específicos (GIRALDO FORERO, 2012). Conforme comprovado pelos autores, a utilização de sistemas inapropriados para selagem corta fogo nas barreiras perimetrais de segurança contra incêndio não garante a compartimentação vertical necessária (SRIVASTAVA; NAKRANI; GHOROI, 2020). A propagação do incêndio ocasionada por uma ineficiente compartimentação vertical entre a estrutura da edificação e a fachada é ilustrada na Figura 21.

Os locais em que ocorrem o encontro da estrutura com a instalação são pontos frágeis, que podem ocasionar a propagação do incêndio para pavimentos adjacentes, de forma que a selagem realizada deve ter a mesma resistência ao fogo que a laje (SĘDŁAK *et al.*, 2017). Assim, caracterizando a selagem corta fogo como barreira contra a propagação do incêndio, com papel essencial para a segurança contra incêndio nas edificações.

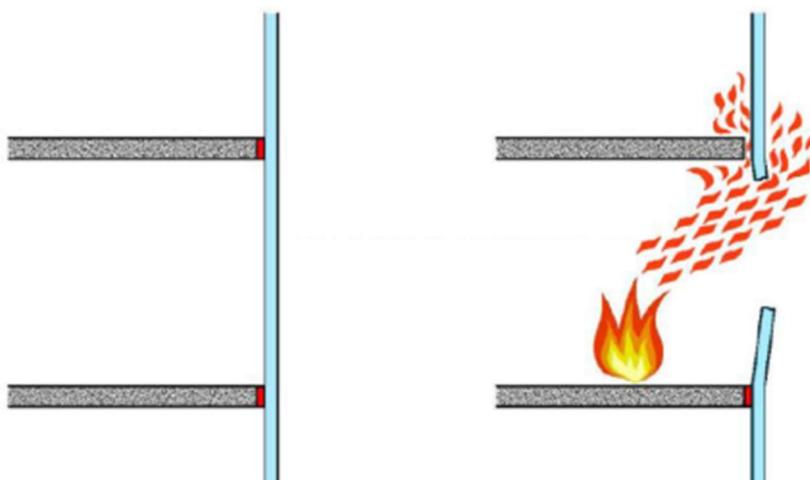
Figura 21 – Exemplo de comportamento: (a) sem compartimentação vertical e (b) com compartimentação vertical



Fonte: thermafiber Insolutions (2018, p. 5).

Segundo Giraldo Forero (2012), além da propriedade corta fogo, os sistemas que compõem a barreira resistente ao fogo localizados entre a fachada envidraçada e a estrutura da edificação necessitam ser capazes de absorver os movimentos diferenciais ocasionados pelo incêndio e pelo vento. Caso contrário, pode ocorrer a situação ilustrada na Figura 22, que demonstra o desprendimento da estrutura, ocasionando a propagação do incêndio para o compartimento superior, mesmo tendo o sistema de compartimentação vertical.

Figura 22 – Desprendimento da estrutura



Fonte: Chen e Victor (2012)

A barreira periférica utilizada para prevenir a propagação interna das chamas é usualmente composta por uma camada de lã de rocha, responsável por resistir ao fogo, e uma camada selante para impedir a passagem de gases (CHEN; VICTOR, 2012).

Conforme resultado obtido através de experimento realizado por Srivastava, Nakrani e Ghoroi (2020), foram comparados dois sistemas: um, sem selagem corta fogo, e outro, com sistema classificado segundo a ASTM E2307 (ASTM, 2020b). Foi possível observar a eficiência na compartimentação vertical entre os pavimentos. No ambiente sem a utilização da selagem corta fogo, o incêndio atingiu dois pavimentos superiores em treze minutos de ignição, enquanto, quando utilizado o sistema de compartimentação, não houve propagação vertical do fogo durante todo o ensaio.

A National Fire Protection Association (NFPA) 5000 (NFPA, 2021) exige que sejam utilizadas barreiras periféricas contra incêndio na união entre a estrutura da edificação e a fachada envidraçada, determinando que o tempo de resistência e estanqueidade ao fogo do sistema seja certificado através do ensaio preconizado na ASTM E2307 (2020b).

De forma complementar, conforme já detalhado no item 2.2.2.1 Regulamentação da Segurança Contra Incêndio no Brasil, a Instrução Técnica nº 09 (SÃO PAULO, 2019e) exige a utilização de selos corta fogo entre a estrutura da edificação e a fachada, somados à utilização de anteparo de 1,20 metro, conforme ilustrado na Figura 5.

2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE COMPARTIMENTAÇÃO VERTICAL PERIMETRAL

O presente item da pesquisa irá abordar as metodologias existentes para realizar a avaliação de sistemas responsáveis por garantir a compartimentação vertical nos sistemas de fachadas envidraçadas. No primeiro subitem serão abordadas normas que estabelecem formas de classificar estes sistemas. No segundo subitem serão conceituadas as exigências das normas brasileiras com relação ao desempenho dos componentes das fachadas envidraçadas.

2.4.1 Avaliação dos Sistemas de Compartimentação Vertical

A NBR 14925 (ABNT, 2019) indica que, para classificar a resistência ao fogo de um sistema com elementos envidraçados, é necessário contemplar os componentes destinados à fixação, integridade, estanqueidade e estabilidade do sistema. Para classificar um sistema, torna-se necessária a execução de um ensaio de resistência ao fogo de um corpo de prova que deve representar, de forma verossímil, as condições de montagem real do sistema: juntas, vínculos e dimensões máximas dos elementos.

Com relação às fachadas cortina, a NBR 14925 (ABNT, 2019) indica a necessidade de ensaiar a amostra de duas formas diferentes: expondo ao fogo pelo lado interno ou pelo lado externo. Quando exposto o lado interno, deve-se adotar a curva-padrão tempo x temperatura, constante na NBR 16965 (ABNT, 2021d), estabelecida também na ISO 834. Com relação ao lado externo, a NBR 14925 (ABNT, 2019) indica o uso da curva tempo x temperatura proveniente da equação:

$$T = 660 (1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (1)$$

Na qual:

“T” é a temperatura expressa em graus Celsius (°C);

“t” é o tempo em minutos.

Com os resultados obtidos através dos ensaios realizados, a NBR 14925 (ABNT, 2019) classifica os sistemas de fachadas envidraçadas segundo o Quadro 6, devendo prevalecer o menor valor obtido nos ensaios. Entretanto, mesmo apresentando classificação de resistência ao fogo, a normativa brasileira não define um procedimento de ensaio para obtenção destes resultados e indica a possibilidade de utilização de normas internacionais para a classificação dos elementos.

Quadro 6 – Classificação para elementos aplicados em fachadas

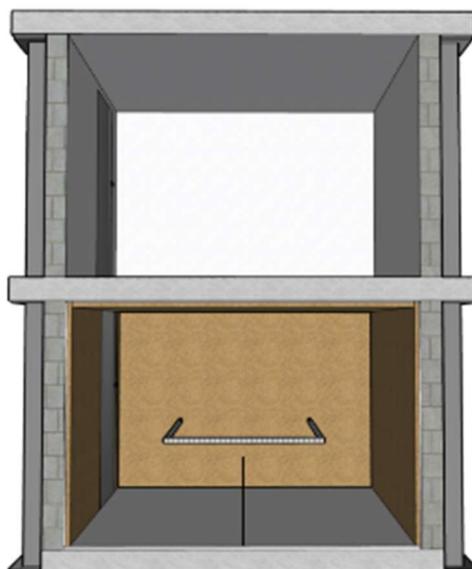
Classificação	15 minutos	20 minutos	30 minutos	60 minutos	90 minutos	120 minutos
E			x	x	x	x
EW			x	x	x	x
EI	x	x	x	x	x	x

Fonte: ABNT (2019, p. 6).

Conforme exposto no Quadro 6, a NBR 14925 (ABNT, 2019) define que a classificação “E” corresponde à integridade, sendo a capacidade do construtivo de compartimentação de resistir ao fogo sem que haja transmissão para o outro lado. A classificação “I” é denominada como isolamento térmica e define a capacidade do elemento de compartimentação de resistir ao fogo e conter a condução de calor para o outro lado não exposto, garantindo que materiais em contato com a superfície não exposta não ignizem e protejam as pessoas próximas à superfície resguardada durante o tempo estabelecido. A classificação “W”, denominada como redução de radiação térmica, define a capacidade do elemento de compartimentação. Ao ser exposto ao fogo em uma de suas faces, garante que a temperatura do lado protegido permaneça baixa por determinado período de tempo.

A ASTM E2307 (ASTM, 2020b), de forma complementar às normas brasileiras, contempla a análise do sistema de selagem periférica, para garantir a compartimentação vertical deste, e a propagação externa em uma situação de incêndio. O equipamento utilizado pela referida normativa é composto por dois ambientes que simulam dois pavimentos: o inferior denominado como sala de testes e o superior, como sala de observação. Cada sala possui 3,05m de largura e profundidade e 2,13m de altura interna, conforme ilustrado na Figura 23.

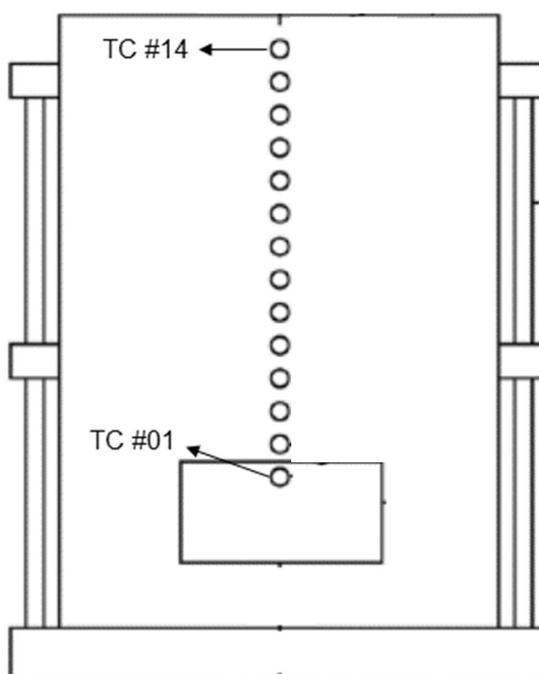
Figura 23 – Estrutura de ensaio segundo ASTM E2307



Fonte: Elaborado por Itt Performance

O ensaio preconizado pela ASTM E2307 (ASTM, 2020b) especifica a curva de temperatura a ser seguida, queimadores (interno e externo), medidas do equipamento, localização dos termopares (vide Figura 24) e temperaturas em cada posição, calibração do sistema, vazão de gás e fluxo de calor.

Figura 24 – Posicionamento dos termopares



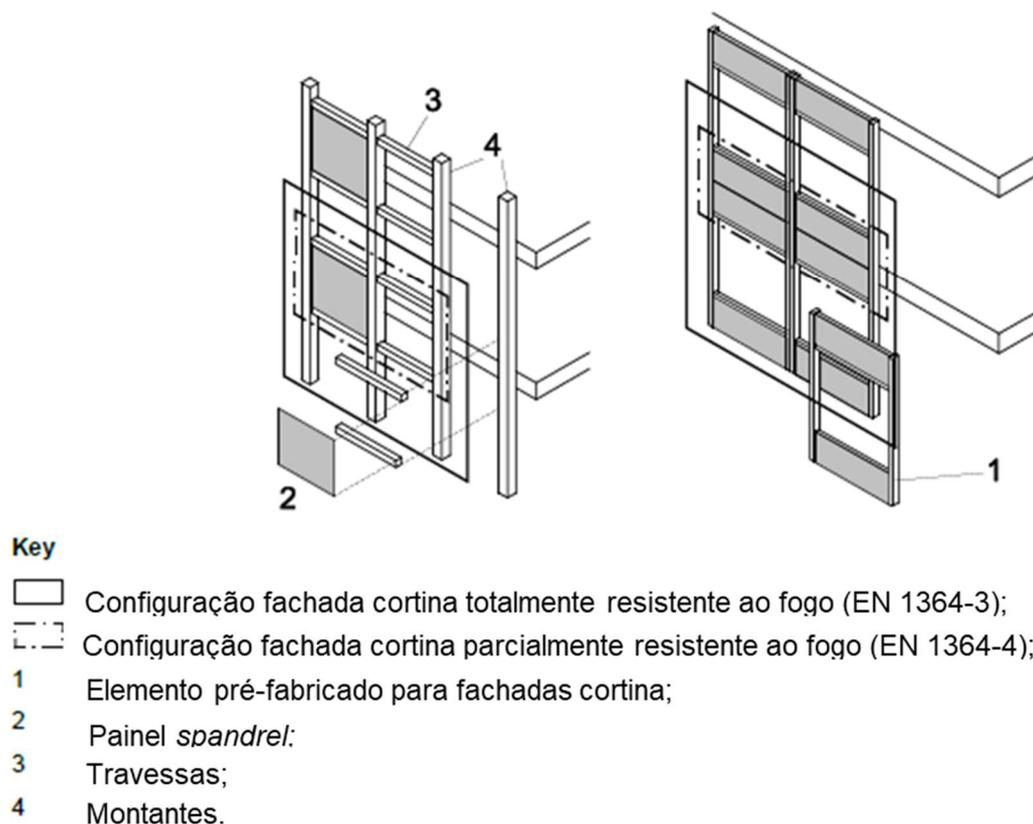
Fonte: Adaptado de ASTM (2020b).

Dentre o escopo da ASTM E2307 (ASTM, 2020b), tem-se a exigência da realização de um procedimento para calibração do equipamento, constituída por uma fachada de gesso acartonado, conforme especificado pela *Gypsum Association* (GA) WP 1538 (GA, 2015), com o intuito de garantir que o equipamento atenda os parâmetros da norma. A parede de calibração possui uma abertura que simula uma janela, a fim de ensaiar a propagação pela parte externa da parede de calibração, que é equipada com 14 termopares alinhados verticalmente no lado externo, três termopares internos à sala de testes, três medidores de fluxo de calor e os dois queimadores (interno e externo).

A ASTM E2874 (ASTM, 2019) utiliza o mesmo aparato constante na ASTM E2307 (ASTM, 2020b) e procedimento de ensaio, entretanto propõem a análise do desempenho do painel *spandrel* de garantir a compartimentação vertical externa entre os pavimentos.

Além da normativa americana, tem-se a BS EN 1364-3 (BRITISH STANDARD INSTITUTION (BSI), 2014a), a qual também contempla metodologia de teste para determinação da resistência ao fogo de sistemas de fachadas cortinas totalmente resistentes ao fogo. Este método possibilita que a amostra seja realizada em fornos verticais, mas somente com exposição interna ou externa, separadamente. Na Figura 25, consta a ilustração das diferentes configurações de fachada cortina (totalmente resistente ao fogo e parcialmente resistente ao fogo).

Figura 25 – Configurações de fachadas cortina para ensaio de resistência ao fogo



Fonte: BSI (2014b, p. 49).

Já a BS EN 1364-4 (BSI, 2014b) também contempla metodologia de teste para determinação da resistência ao fogo de fachada cortina parcialmente resistente ao fogo (apenas no painel *spandrel*) e da selagem perimetral. Este método possibilita que a amostra seja realizada em fornos verticais e/ou horizontais e não contempla a montagem de fachada pele de vidro em escala real.

Nesta metodologia, o ensaio pode considerar a exposição externa e interna simultaneamente e independentemente, tanto da selagem perimetral quanto do painel *spandrel*, mediante instalação específica, conforme ilustra a Figura 26. Ao todo, a referida normativa considera cinco configurações-padrão de ensaio, podendo variar o posicionamento do painel *spandrel*, selagem perimetral e a forma de exposição ao fogo do sistema ensaiado. A altura do *spandrel* fica correlacionada com a legislação local.

3 MÉTODO

O presente programa experimental teve por objetivo simular situação de incêndio com propagação externa do fogo ao pavimento superior em uma fachada através de uma janela, bem como a calibração do equipamento proposto pela ASTM E2307 (ASTM, 2020b) e ASTM E2874 (ASTM, 2019) para testar a segurança contra incêndio de sistemas de barreiras perimetrais em fachadas cortina. Este capítulo será dividido em cinco itens para descrever as características do equipamento, instrumentação, procedimento da calibração realizada e ensaio de selagem perimetral em fachada pele de vidro.

3.1 ESTRUTURA DO APARATO

O aparato de testes simula uma edificação de dois pavimentos, com 5,60 metros de altura. O primeiro pavimento é denominado como sala de testes e o segundo, como sala de observação. Ambas as salas têm dimensões internas de 2,50 metros de largura, 2,0 metros de profundidade e 2,50 metros de altura.

A estrutura do equipamento é composta por quatro galerias pré-moldadas de concreto armado, com dimensões internas de 2,50 metros de largura livre, 1,0 metro de comprimento e 2,50 metros de altura livre, com mísulas de 15 centímetros de espessura, totalizando dimensões externas de 2,80 metros de largura e 2,80 metros de altura (Fotografia 1). O concreto utilizado tem resistência de 20 MPa.

Fotografia 1 – Galerias de concreto armado



Fonte: Registrada pelo autor.

O fechamento aos fundos das galerias foi feito com parede de *drywall*, sendo que, no primeiro pavimento, a face interna é composta por placas de gesso resistente ao fogo de 15 milímetros, manta cerâmica de densidade de 128 kg/m^3 no interior e a face externa com placa de gesso *standard*. Enquanto que no pavimento superior foi feito com uma placa de gesso *standard* nas duas faces.

A sala de teste recebeu tratamento térmico com placas de gesso resistente ao fogo de espessura de 15 milímetros e manta cerâmica de densidade de 128 kg/m^3 . As paredes laterais, fundos e teto receberam uma camada de chapas de gesso e uma camada de manta cerâmica. O piso foi revestido por duas camadas de chapas de gesso resistente ao fogo de 15 milímetros e manta cerâmica de densidade de 128 kg/m^3 , conforme apresentado na Fotografia 2.

Fotografia 2 – Revestimento interno da sala de testes



Fonte: Registrada pelo autor.

O aparato possui dois queimadores, um interno à sala de testes e outro externo, ambos com formato retangular. O queimador externo tem dimensões de 2,00x1,52 metros e o queimador interno com dimensões de 1,524 x 1,118 metro. Ambos constituídos por estrutura tubular de aço inox de diâmetro externo de 51 milímetros.

O queimador interno possui furos com diâmetros de 3,2 milímetros na parte superior da tubulação e foi posicionado de forma que os furos iniciam em ambos os lados do queimador a partir de 1,06 metro da parede de fundos da sala de testes em direção à parte frontal, conforme Fotografia 3. O queimador consta posicionado a 76 centímetros do piso da sala de testes.

Fotografia 3 – Distância dos furos do queimador a partir da parede de fundos



Fonte: Registrada pelo autor.

O queimador externo possui abertura horizontal na parte superior da tubulação frontal, com dimensões de 1,3 x 111,8 centímetros. A referida abertura conta posicionada a 1,30 metro do chão, paralela com a estrutura do ensaio junto à parede.

Tanto o queimador externo quanto o interno foram abastecidos por gás GLP através de tubulação com diâmetro de 25 milímetros.

A parte frontal do aparato foi fechada com parede com dimensões 3,50 x 6,00 metros, composta por duas camadas de chapas de gesso resistente ao fogo de espessura de 15 milímetros em cada face da parede, perfis metálicos com espaçamento de 60 centímetros, com uma janela posicionada a 76,2 centímetros em relação ao piso da sala de testes, centralizada, com dimensões de 1,98 x 0,762 metros.

A amostra foi instalada em estrutura metálica com rodas para possibilitar a sua movimentação, instalação e fixação na estrutura de concreto armado em quatro pontos através de cantoneiras metálicas dobradas em forma de mão-francesa.

A parte interna da parede foi revestida com manta cerâmica, de espessura 2,5 centímetros e densidade 128 kg/m³, bem como nas juntas entre parede e estrutura de concreto, para evitar perdas de calor por frestas existentes no encontro entre os elementos.

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para medição da temperatura ao longo do ensaio, foram utilizados 23 termopares tipo K, posicionados tanto na parede de calibração quanto na parte interna da sala de testes.

Foram utilizados 3 sensores de fluxo de calor refrigerado à água tipo Schmidt - Boelter, posicionados na sala de observação, junto à parede de calibração.

A trajetória da pluma ejetada pela abertura foi registrada por meio de filmagem e fotografia.

Também foram utilizadas duas câmeras termográficas: uma FLIR One Pro LT acoplada a um smartphone SAMSUNG NOTE 10 PLUS e uma FLIR A300-Series.

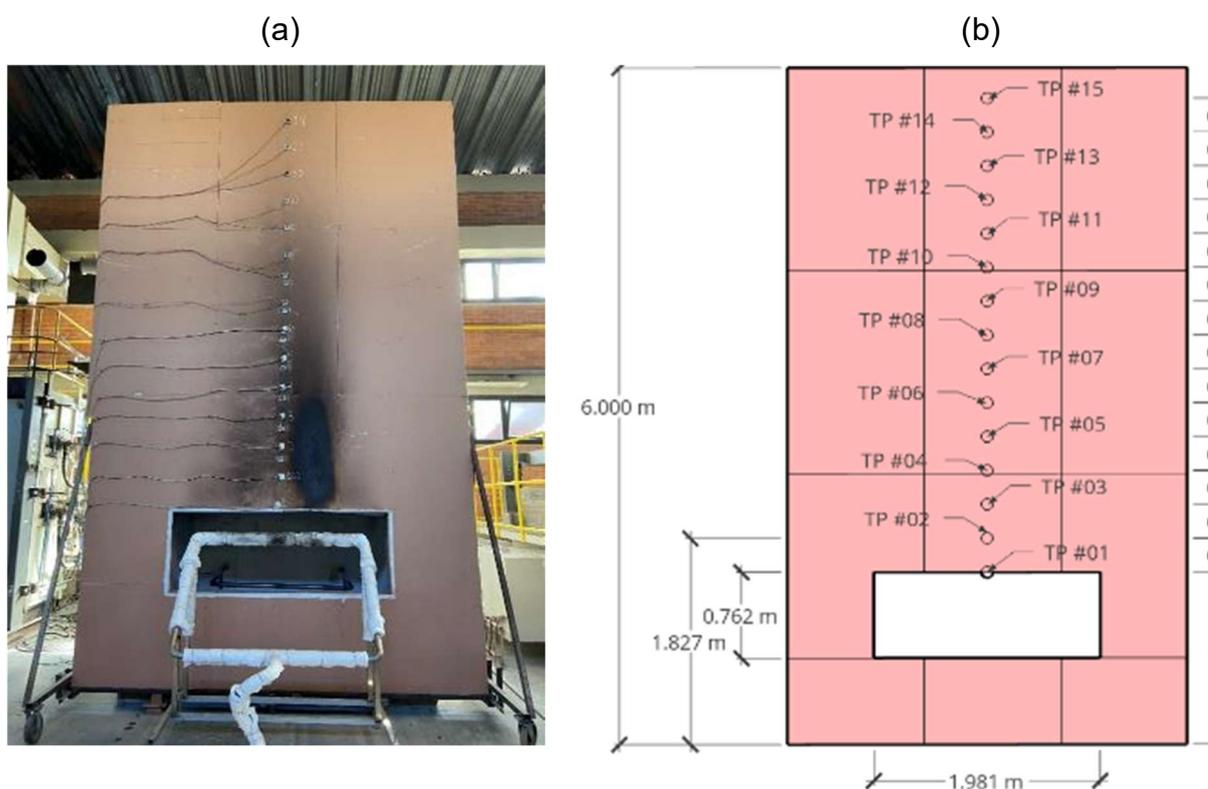
Para controle da vazão do gás nos queimadores, foram utilizados dois rotômetros. O primeiro, controlando o queimador externo, com capacidade de 1,6 m³/min e o segundo, controlando o queimador interno, com capacidade de 3,3 m³/min.

Para medição da pressão interna durante o ensaio, foram utilizados dois sensores de pressão, um do modelo Huba Control 699, para pressões negativas, e outro Novus Automation NP800H.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO

Na parte externa, no eixo central da parede, foram posicionados 15 termopares, conforme Figura 27, que foram capazes de medir a temperatura em cada ponto estabelecido durante o ensaio. Os primeiros sete termopares, mais próximos ao queimador externo, foram revestidos por miçangas cerâmicas, o que atribuiu maior resistência ao fogo do fio que compõe o termopar, para evitar que as medições restassem prejudicadas.

Figura 27 – (a) Parede de calibração e posicionamento dos termopares; (b) Posicionamento dos termopares na parte externa da parede

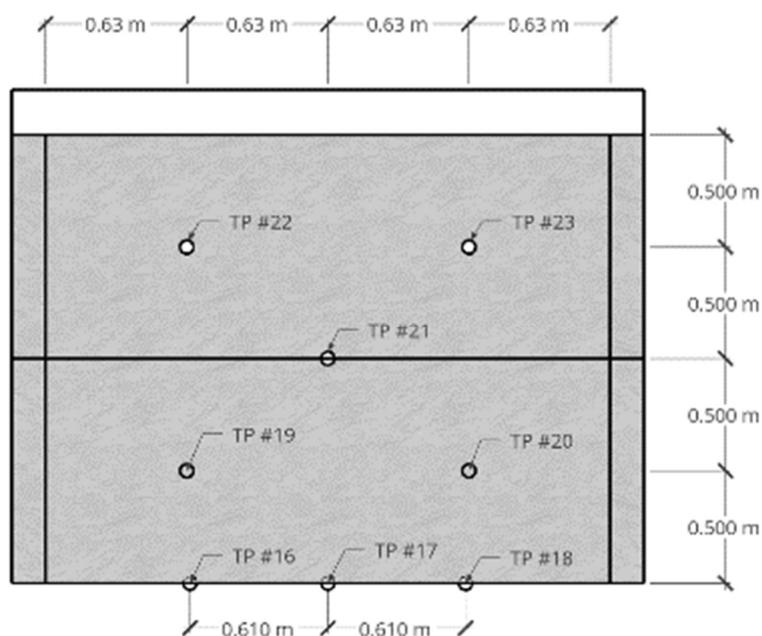


Fonte: Elaborada pelo autor.

Internamente, foram posicionados oito termopares na sala de testes, necessários para medir a temperatura interna. Destes, três estão posicionados junto à parede, a uma distância de 30 centímetros do teto: o primeiro centralizado (TP #17), o segundo a 61

centímetros à esquerda (TP #16) e o terceiro a 61 centímetros à direita (TP #18). Centralizados na sala de testes, foram posicionados cinco termopares (TP #19 ao TP #23) a uma distância de 30 centímetros do teto, conforme as Figura 28 e Fotografia 4.

Figura 28 – Termopares posicionados na sala de testes



Fonte: Elaborada pelo autor.

Fotografia 4 – Posicionamento dos termopares TP #19 ao TP #23



Fonte: Registrada pelo autor.

Os sensores de pressão foram alinhados verticalmente entre si, na galeria inferior aos fundos, sendo o primeiro colocado a 50 centímetros do teto e o segundo, a 0,50 centímetros do piso.

Os três sensores de fluxo de calor foram instalados no centro da sala de observação, alinhados verticalmente e paralelos à parede de calibração, estando o primeiro posicionado a 5 centímetros do piso, o segundo, a trinta, e o terceiro, a 60 centímetros, conforme ilustrado na Fotografia 5.

Fotografia 5 – Posicionamento dos sensores de fluxo de calor



Fonte: Registrada pelo autor.

3.4 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

O procedimento executado segue as ASTM E2307 (2020b) e ASTM E2874 (2019), e tem como principal objetivo atingir as temperaturas exigidas pelas normativas.

Durante os primeiros trinta minutos, a curva de temperatura a ser seguida varia em cada localidade do ensaio. A temperatura média na sala de teste é medida pelos termopares #19 ao #23 e a temperatura média na face interior da parede externa é medida pelos termopares TP #16, TP #17 e TP #18. Enquanto que externamente, dentre os 15 termopares posicionados, apenas as médias dos TP #02 ao TP #07 foram devidamente utilizadas para definir o atendimento, ou não, dos valores estabelecidos pelas normas.

Quadro 7 – Valores médios para calibração

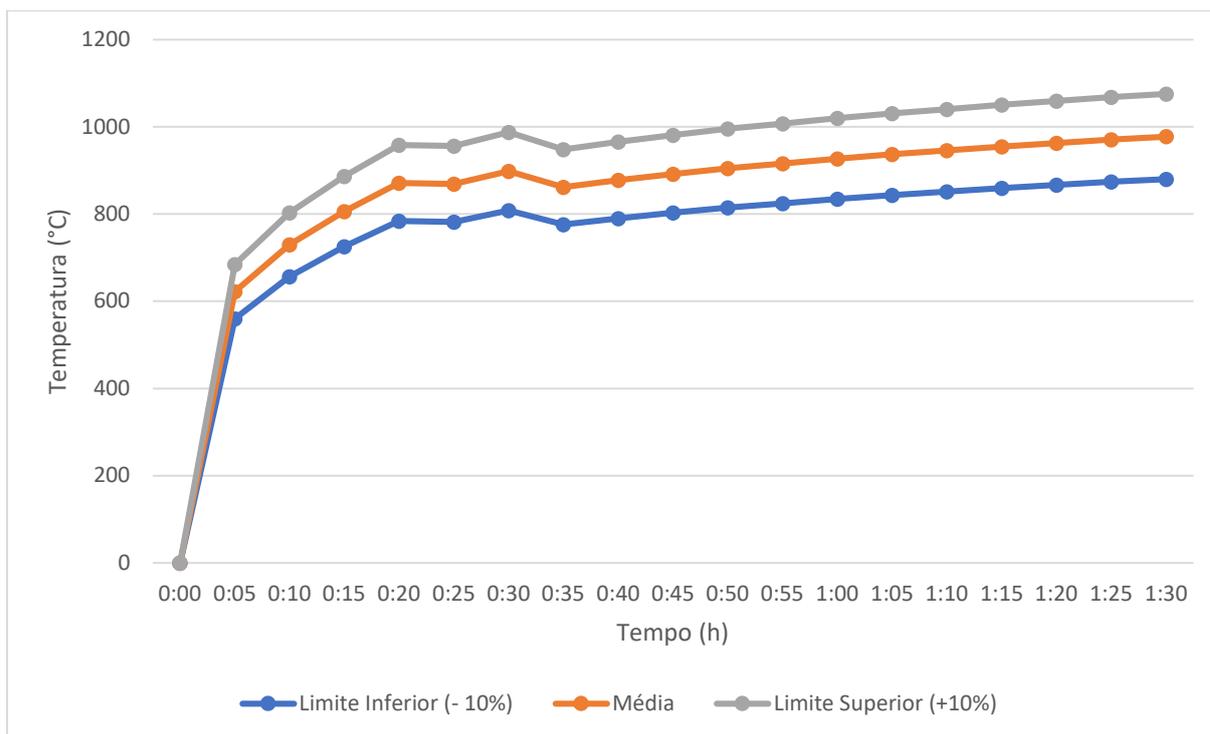
Descrição	Tempo (minutos)					
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
Temperatura média na sala de teste (°C)	622	730	806	871	869	898
Temperatura média na face interior da parede externa (°C)	574	703	778	859	858	902
Temperatura no TP #02 (°C)	317	466	511	533	563	581
Temperatura no TP #03 (°C)	359	546	605	639	674	702
Temperatura no TP #04 (°C)	341	521	591	634	674	712
Temperatura no TP #05 (°C)	302	459	528	573	613	662
Temperatura no TP #06 (°C)	272	407	469	509	542	597
Temperatura no TP #07 (°C)	244	366	419	458	489	543

Fonte: ASTM (2020b).

As médias das temperaturas foram estabelecidas através da medição a cada 5 segundos, excluindo-se os valores nos 15 segundos iniciais e 15 segundos finais para evitar que alterações na vazão dos queimadores interfiram nos dados. Cada intervalo tem tolerância de aproximadamente 10% na variação da temperatura.

Após o término do intervalo de trinta minutos, a vazão de gás do queimador externo foi mantida. Enquanto internamente, a temperatura média da sala de testes seguiu a curva de temperaturas constante na ASTM E119 (ASTM, 2020a), ajustando-se a vazão do queimador da sala de testes, conforme demonstrado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva de temperatura média e tolerâncias.



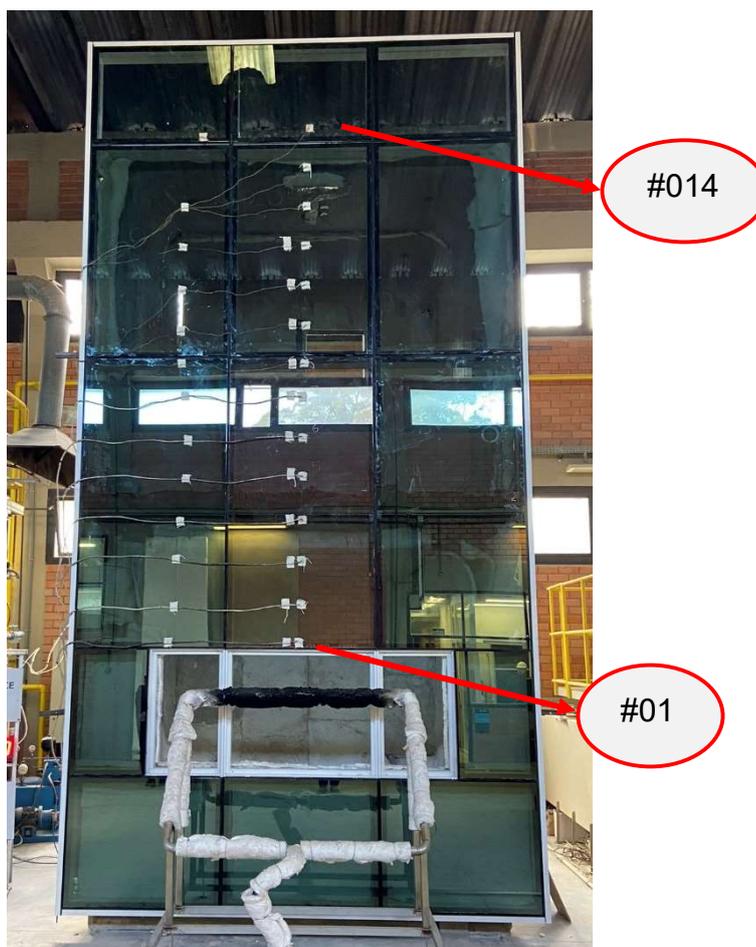
Fonte: Elaborado pelo autor.

As temperaturas nos termopares TP #01 e do TP #08 ao TP #15 foram medidas e serviram para análise do aumento de temperatura ao longo da fachada da parede, porém não foram utilizadas para determinação da calibração do equipamento.

3.5 ENSAIO DA SELAGEM PERIMETRAL EM FACHADA PELE DE VIDRO

Após a realização da calibração do aparato, foi instalada a fachada pele de vidro com dimensões de 3,50 x 6,25 metros, com uma janela posicionada a 76,2 centímetros em relação ao piso da sala de testes, centralizada, com dimensões de 1,98 x 0,762 metros. Foram utilizados vidros laminados *silver* 32 OG float 6.0 mm, PVB 0.38, vidro float 4.0 mm, perfis de alumínio da linha Ecostick, silicone estrutural bicomponente SG-500 CN da marca Sika. Na Figura 29 consta a fachada pele de vidro utilizada para o teste e os quatorze termopares instalados ao longo da fachada para medição da temperatura externa.

Figura 29 - Fachada pele de vidro e termopares ao longo da fachada

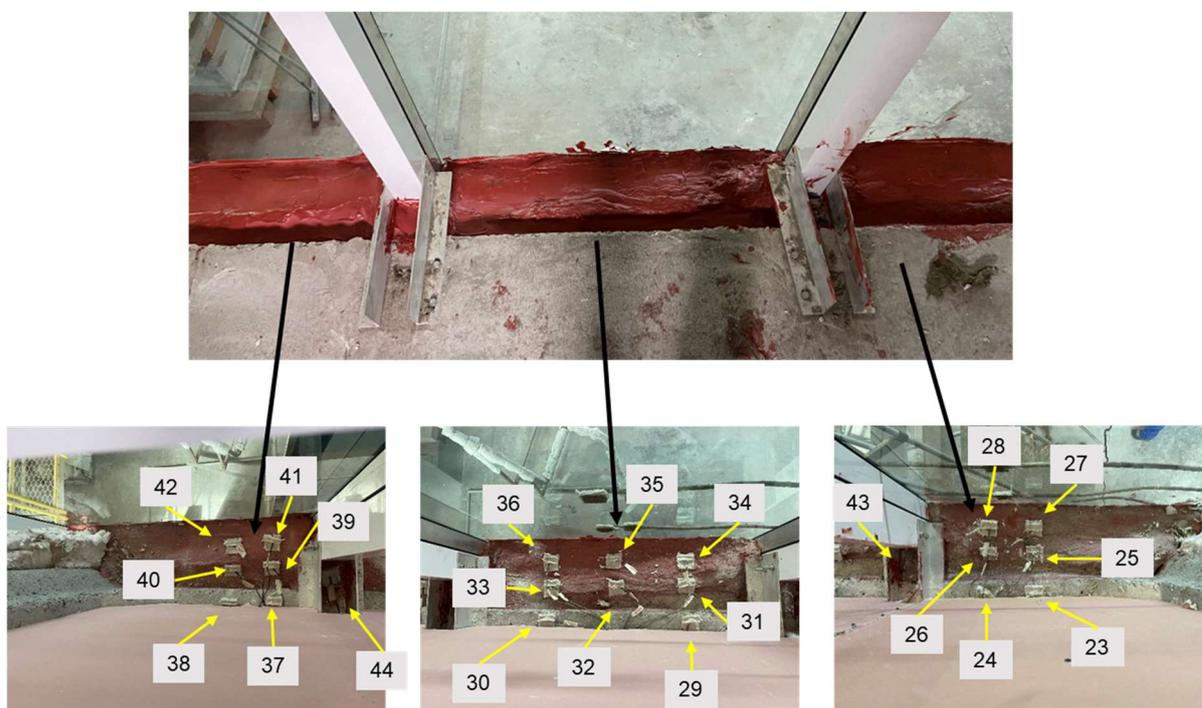


Fonte: Registrada pelo autor.

Para o sistema de selagem, foi utilizada placa de lã de rocha de densidade de 64kg/m^2 , espessura de 100 mm, com as fibras da lã posicionadas na vertical, com taxa de compressão de aproximadamente 66% e aplicação de pintura elastomérica CFS-SP WB vermelha da marca Hilti, aplicada de forma manual com espessura de tinta de aproximadamente 6,0 mm.

A instrumentação na selagem correu através da colocação de vinte e dois termopares tipo K, distribuídos conforme Figura 30.

Figura 30 - Distribuição dos termopares na selagem perimetral (vista superior na sala de observação)



Fonte: Registrada pelo autor.

Foi acrescentado também anteparo vertical de 90 centímetros composto por duas camadas de gesso resistente ao fogo de espessura de 15 mm em cada face da parede, com espessura total desta de 10,8 centímetros, largura da estrutura de 4,8 centímetros e distância entre os montantes de 60 centímetros. O referido anteparo foi instalado na sala de observação, no limite da laje entre os pavimentos, junto à fachada e, ao somar-se à espessura da laje, totaliza 1,20 metro, conforme ilustrado na Fotografia 8.

De forma adicional ao estabelecido pelas ASTM E2307 e ASTM E2874, foram utilizados dois termopares tipo K, numerados como termopares 45 e 56, instalados 10 cm acima do anteparo vertical, bem como um sensor de fluxo de calor refrigerado à água tipo Schmidt – Boelter posicionado junto aos termopares.

A instrumentação restante, tanto do aparato como da fachada ensaiada, seguiu conforme o item 3.3 INSTRUMENTAÇÃO anteriormente descrito, à exceção dos três sensores de fluxo de calor refrigerados à água tipo Schmidt – Boelter posicionados conforme Fotografia 4, pois estes não eram necessários para fins do ensaio de um sistema de selagem perimetral em fachada pele de vidro segundo as normativas. Foi

instalado apenas um sensor de fluxo de calor centralizado no topo do anteparo vertical, conforme Fotografia 6.

Fotografia 6 – Anteparo vertical na sala de observação



Fonte: Registrada pelo autor.

Através da calibração realizada, a vazão de gás adotada em cada queimador durante a duração do ensaio de resistência ao fogo da selagem perimetral em fachada pele de vidro foi determinada conforme a Tabela 3. A vazão máxima interna é considerada quando, por conta da diferença entre os materiais da fachada pele de vidro e da parede de calibração, ocorre diferença entre as temperaturas medidas no interior do aparato quando do ensaio da pele de vidro, podendo-se alcançar as vazões máximas no queimador interno.

Tabela 3 – Vazões de gás estabelecidas através da calibração

Tempo (min)	Queimador interno (m³/min)	Queimador externo (m³/min)	Vazão Máxima interna (m³/min)
0	0,4	0	0
5	0,45	0,25	0
10	0,5	0,3	0
15	0,5	0,35	0
20	0,5	0,32	0
25	0,7	0,4	0
30	0,5	0,4	0,78
35	0,55	0,4	0,78
40	0,6	0,4	0,78
45	0,55	0,4	0,78
50	0,57	0,4	0,78
55	0,57	0,4	0,78
60	0,6	0,4	0,78
65	0,68	0,4	0,78

Fonte: Elaborada pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados da calibração, comparando-os com os critérios da ASTM E2307 (2020b) e ASTM E2874 (2019), bem como os resultados obtidos do ensaio de selagem perimetral em um sistema de fachada pele de vidro. Assim, o presente item será dividido em dois subitens: análise dos resultados do procedimento de calibração e análise dos resultados do ensaio de selagem perimetral em fachada pele de vidro, sendo que em cada um deles serão apresentados os resultados e em seguida será feita uma discussão dos resultados obtidos em cada subitem.

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

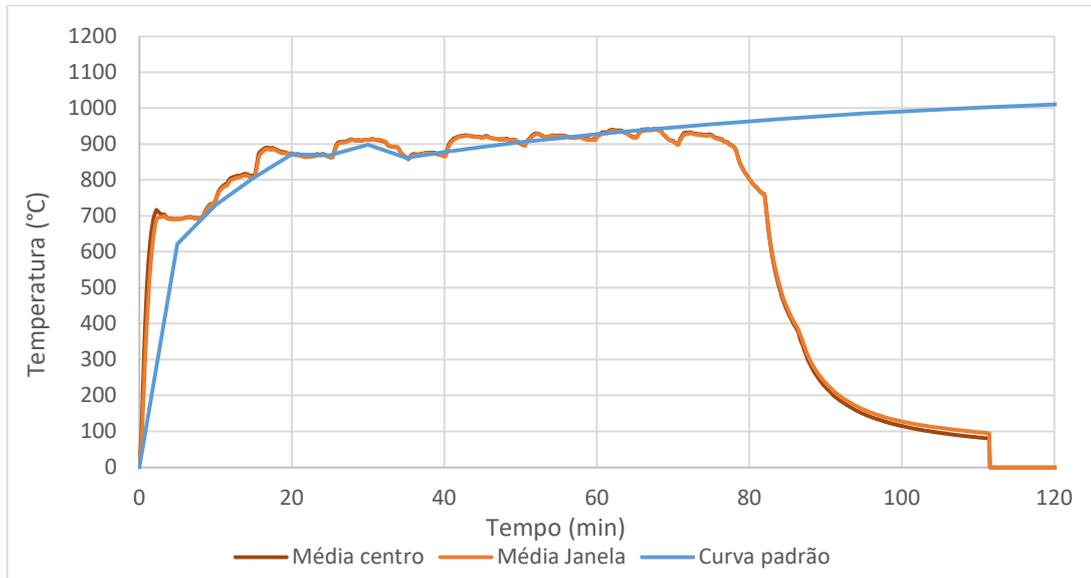
Através dos parâmetros adotados pela ASTM E2307 (ASTM, 2020b) e pela ASTM E2874 (2019) para calibração do equipamento, considerando necessária a análise de diferentes aspectos: temperaturas internas, temperaturas externas. O presente item é dividido em três subitens: temperaturas internas, temperaturas externas e discussão dos resultados.

4.1.1 Temperaturas Internas

Na parte interna da sala de testes, foram posicionados oito termopares ao todo, sendo três junto à parede de calibração e cinco distribuídos no interior do compartimento, conforme Figura 28. Visto que o procedimento de calibração conforme a ASTM E2307 (2020b) exige controle específico de temperaturas durante os primeiros 30 minutos e posterior a isso seguir a curva da ASTM E119, no Gráfico 2 é apresentado gráfico com a média das temperaturas medidas nos termopares próximos à janela (#16 ao #18) e dos termopares centralizados no ambiente (#19 ao #23) durante todo o procedimento de calibração comparados com os parâmetros estabelecidos na ASTM E2307 (2020b) e ASTM E2874 (2019).

As temperaturas medidas após uma hora e quinze minutos de calibração representam a diminuição da temperatura interna do aparato após o desligamento dos queimadores.

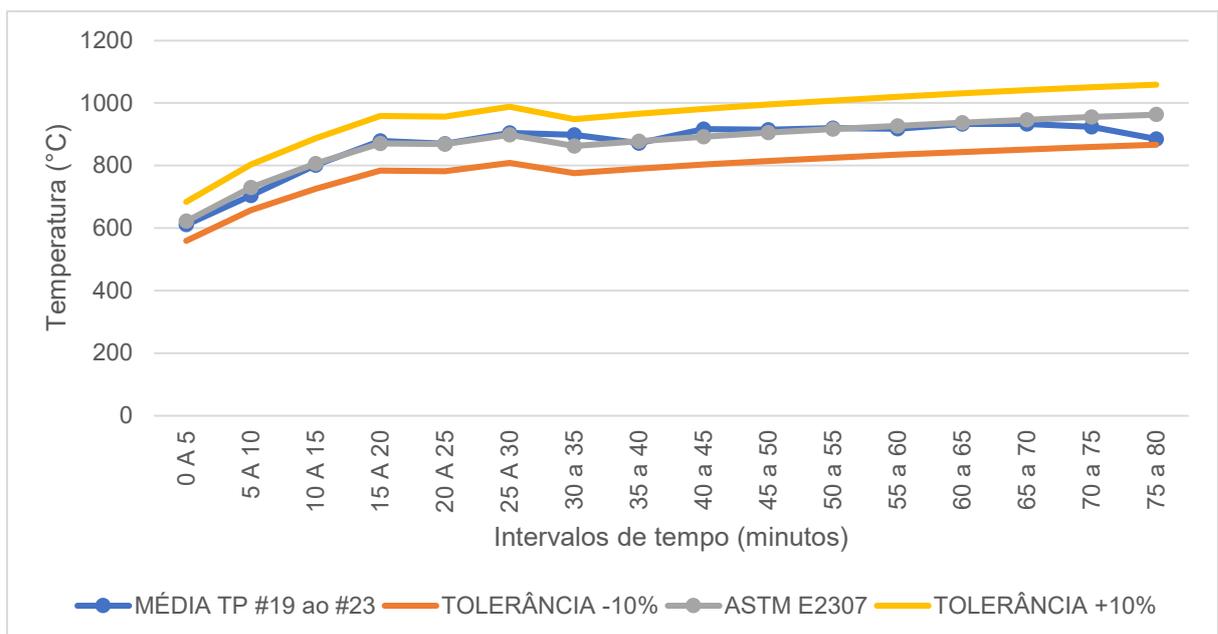
Gráfico 2 - Temperatura média dos termopares posicionados próximos à janela (#16 ao #18) e dos termopares posicionados centralizados (#19 ao #23).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando-se separadamente, a média das temperaturas dos termopares #19 ao #23 se manteve dentro dos parâmetros estabelecidos pela ASTM E2307 (2020b) e ASTM E2874 (2019), conforme gráfico apresentado no Gráfico 3, que são críticos para a calibração do equipamento, visto que é o parâmetro de controle principal após os trinta minutos de ensaio.

Gráfico 3 - Temperatura média dos termopares #19 ao #23



Fonte: Elaborado pelo autor.

As variações das temperaturas medidas durante o procedimento de calibração dos termopares #19 ao #23 durante os 80 minutos constam na Tabela 4, as quais demonstram que estiveram dentro dos limites estabelecidos pela ASTM E2307 (2020b) e ASTM E2874 (2019) durante todo tempo.

Tabela 4 – Média das temperaturas dos termopares #19 ao #23 e variação

MÉDIA TP #19 ao #23 (°C)	TOLERÂNCIA -10% (°C)	ASTM E2307 (°C)	TOLERÂNCIA +10% (°C)	Variação (%)
610,90	559,80	622,00	684,20	-1,78%
703,56	657,00	730,00	803,00	-3,62%
801,27	725,40	806,00	886,60	-0,59%
878,78	783,90	871,00	958,10	0,89%
869,84	782,10	869,00	955,90	0,10%
904,36	808,20	898,00	987,80	0,71%
898,30	775,80	862,00	948,20	4,21%
871,76	790,20	878,00	965,80	-0,71%
916,44	802,80	892,00	981,20	2,74%
914,28	814,50	905,00	995,50	1,02%
919,27	824,40	916,00	1007,60	0,36%
917,99	834,30	927,00	1019,70	-0,97%
933,11	843,30	937,00	1030,70	-0,42%
932,95	851,40	946,00	1040,60	-1,38%
923,77	859,50	955,00	1050,50	-3,27%
884,41	866,70	963,00	1059,30	-8,16%

Fonte: Elaborada pelo autor.

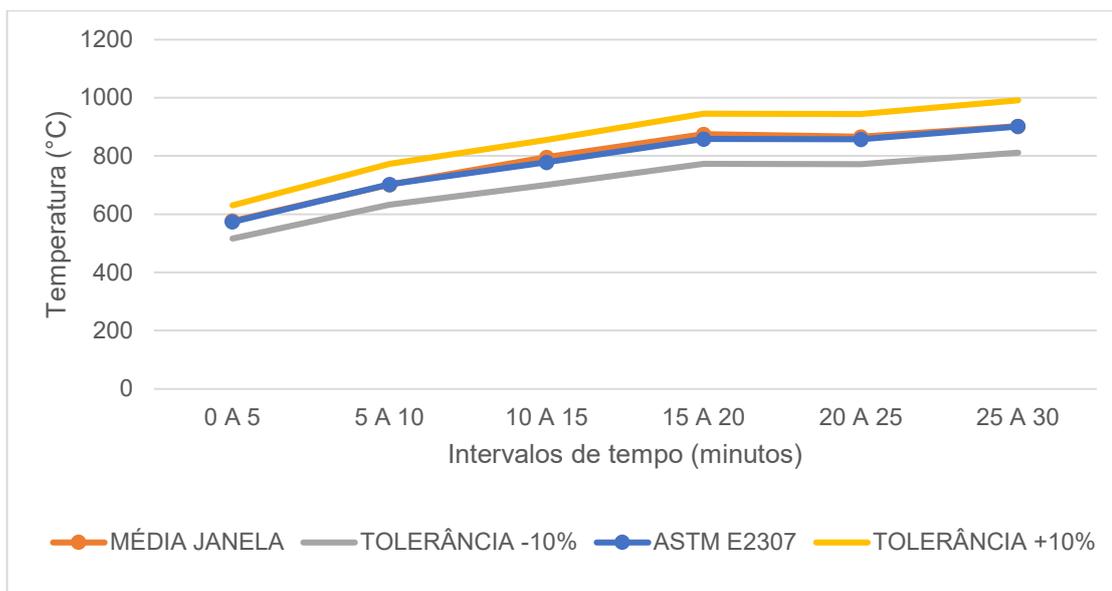
Já os termopares #16 ao #18 se restringiram aos primeiros trinta minutos para análise de calibração. Conforme Gráfico 4 e Tabela 5, constata-se que as temperaturas medidas estão dentro do intervalo admissível pela ASTM E2307 (2020b).

Tabela 5 – Média das temperaturas dos termopares #16 ao #18 e variação em torno da média da ASTM E2307 e ASTM E2874.

MÉDIA TP #16 ao #18 (°C)	TOLERÂNCIA -10% (°C)	ASTM E2307 (°C)	TOLERÂNCIA +10% (°C)	Variação (%)
577,23	516,60	574,00	631,40	0,56%
702,22	632,70	703,00	773,30	-0,11%
796,49	700,20	778,00	855,80	2,38%
874,58	773,10	859,00	944,90	1,81%
866,77	772,20	858,00	943,80	1,02%
902,81	811,80	902,00	992,20	0,09%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 4 - Temperatura média dos termopares #16 ao #18



Fonte: Elaborado pelo autor.

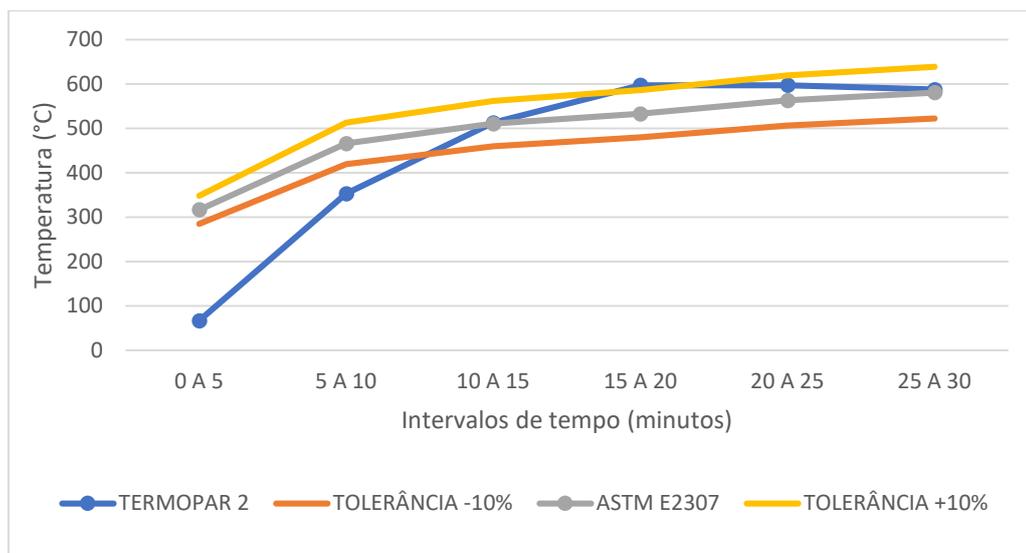
4.1.2 Temperaturas Externas

Com o posicionamento dos quinze termopares ao longo da parede de calibração (conforme ilustrado na Figura 27), foi possível analisar a temperatura incidente nas diferentes alturas da parede em cada intervalo de tempo estabelecido.

Para fins de calibração do aparato, apenas dos termopares #02 ao #07 possuem curva de temperatura especificada pela ASTM E2307 (2020) e ASTM E2874 (2019), conforme constante no Quadro 7, durante os primeiros trinta minutos.

O termopar #02 seguiu a curva de temperatura constante no Gráfico 5 durante os trinta primeiros minutos. Foi possível verificar que até os dez minutos o termopar esteve em temperatura inferior ao atribuído pela normativa e se manteve dentro dos parâmetros estabelecidos nos intervalos seguintes.

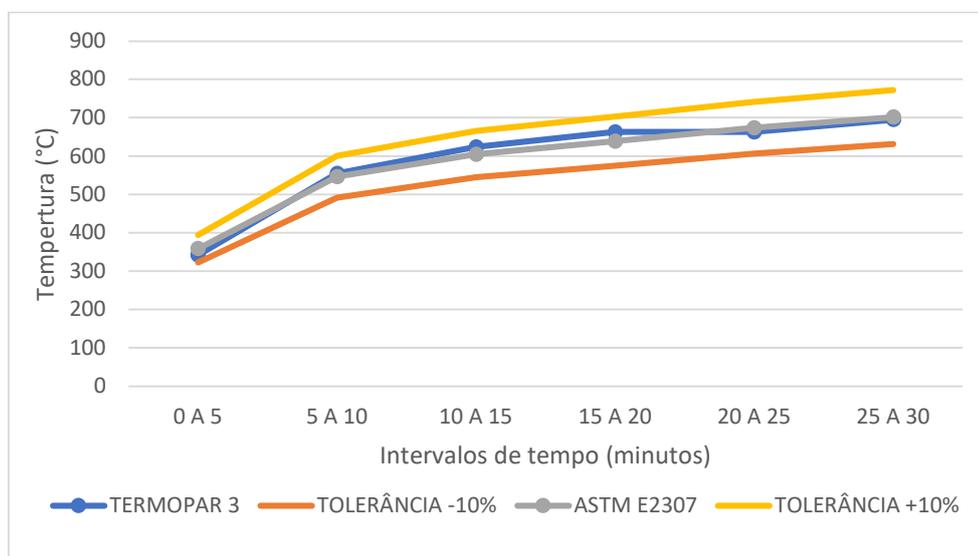
Gráfico 5 - Curva de temperatura do Termopar #02



Fonte: Elaborado pelo autor.

O termopar #03 seguiu a curva de temperatura durante os trinta primeiros minutos, conforme ilustrado no Gráfico 6. Foi possível verificar que as temperaturas medidas se mantiveram durante todo tempo dentro dos parâmetros atribuídos pelas normativas.

Gráfico 6 - Curva de temperatura do Termopar #03

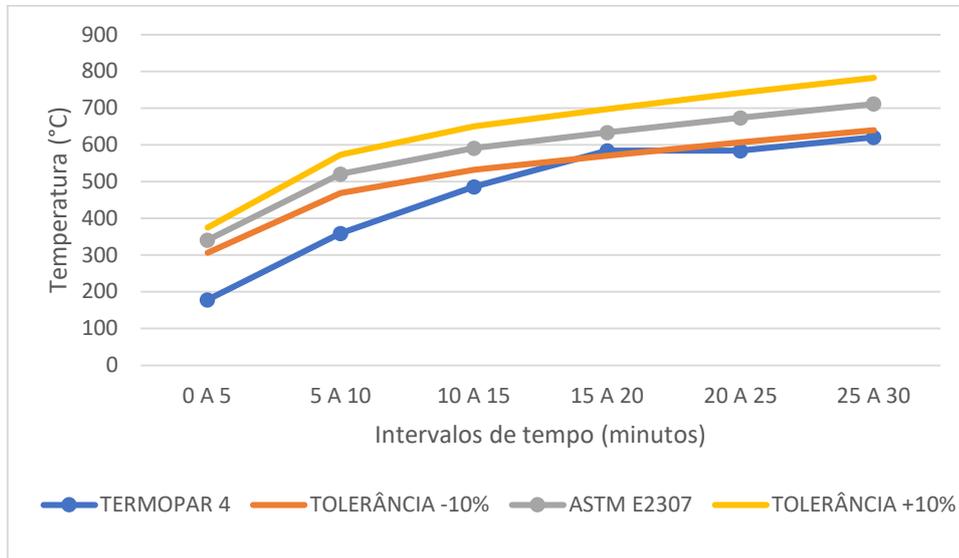


Fonte: Elaborado pelo autor.

As temperaturas medidas pelo termopar #04 seguiram a curva constante no Gráfico 7. Foi possível visualizar que, até os primeiros quinze minutos, as temperaturas medidas ficaram abaixo do intervalo indicado pelas normativas, mas se

aproximando do limite inferior. A partir dos 15 minutos, foram medidas temperaturas dentro da tolerância e muito próximas ao limite inferior.

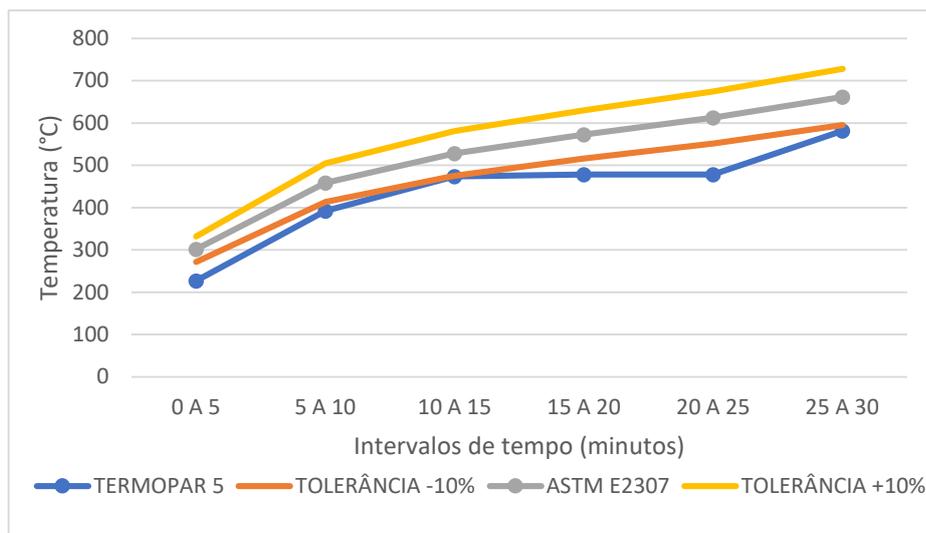
Gráfico 7 - Curva de temperatura do Termopar #04



Fonte: Elaborado pelo autor.

As temperaturas medidas pelo termopar #05 seguiram a curva constante no Gráfico 8. As temperaturas medidas nos intervalos 5 a 10 minutos e 25 a 30 minutos estiveram bastante próximas às temperaturas mínimas estabelecidas, enquanto que no intervalo de 10 a 15 minutos a temperatura superou a temperatura mínima.

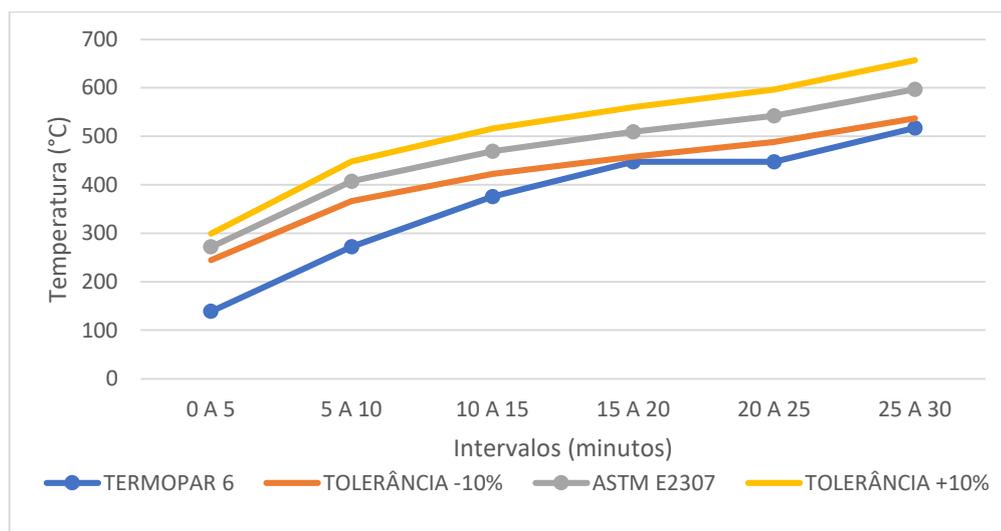
Gráfico 8 - Curva de temperatura do Termopar #05



Fonte: Elaborado pelo autor.

As temperaturas medidas pelo termopar #06 seguiram a curva constante no Gráfico 9, na qual é possível visualizar que as temperaturas medidas ficaram abaixo do limite mínimo estabelecido pela normativa, à exceção do intervalo de 15 a 20 minutos. É possível identificar também que as temperaturas se aproximaram do intervalo tolerado pela ASTM E2307 e E2874 no decorrer da calibração.

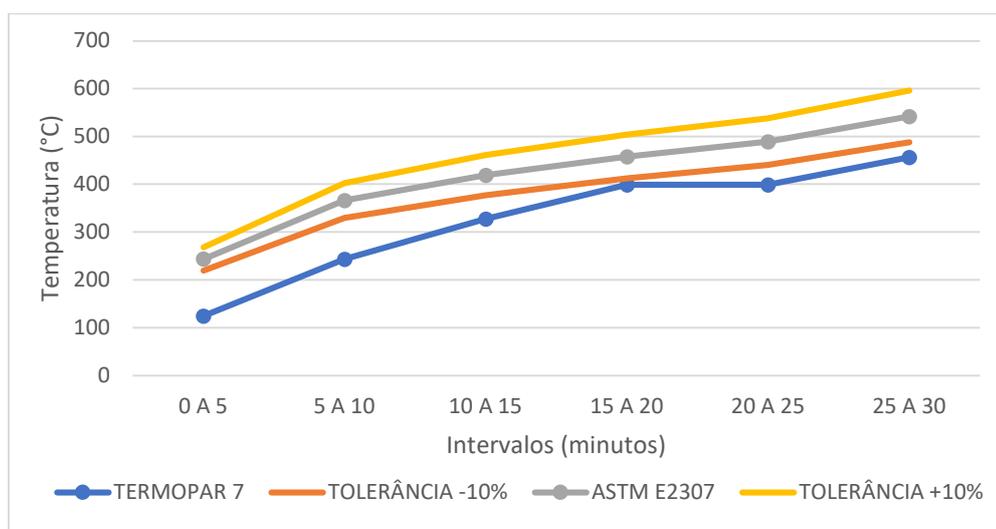
Gráfico 9 - Curva de temperatura do Termopar #06



Fonte: Elaborado pelo autor.

As temperaturas medidas pelo termopar #07 seguiram a curva constante no Gráfico 10, na qual é possível visualizar que as temperaturas medidas ficaram abaixo do limite mínimo estabelecido pela normativa, à exceção do intervalo de 15 a 20 minutos. É possível identificar também que as temperaturas se aproximaram do intervalo tolerado pela ASTM E2307 e E2874 no decorrer da calibração.

Gráfico 10 - Curva de temperatura do Termopar #07



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Discussão dos Resultados

Os resultados apresentados no item 4.1.1 Temperaturas Internas demonstram que as temperaturas medidas na sala de testes do aparato atenderam durante todo período da calibração às temperaturas estabelecidas pelas normas ASTM E2307 (2020b) e ASTM E2874 (2019) para o tempo de calibração proposto. Sendo o único parâmetro com temperaturas a serem seguidas após os primeiros trinta minutos de calibração.

Com relação ao item 4.1.2 Temperaturas Externas, percebe-se que, à exceção do termopar #03, as temperaturas medidas não atingiram integralmente os parâmetros estabelecidos pelas ASTM E2307 e ASTM E2874. Entretanto, as próprias normativas estabelecem duas possíveis soluções: alterar a vazão de gás e repetir a calibração ou apenas ajustar a posição do queimador externo para o futuro teste.

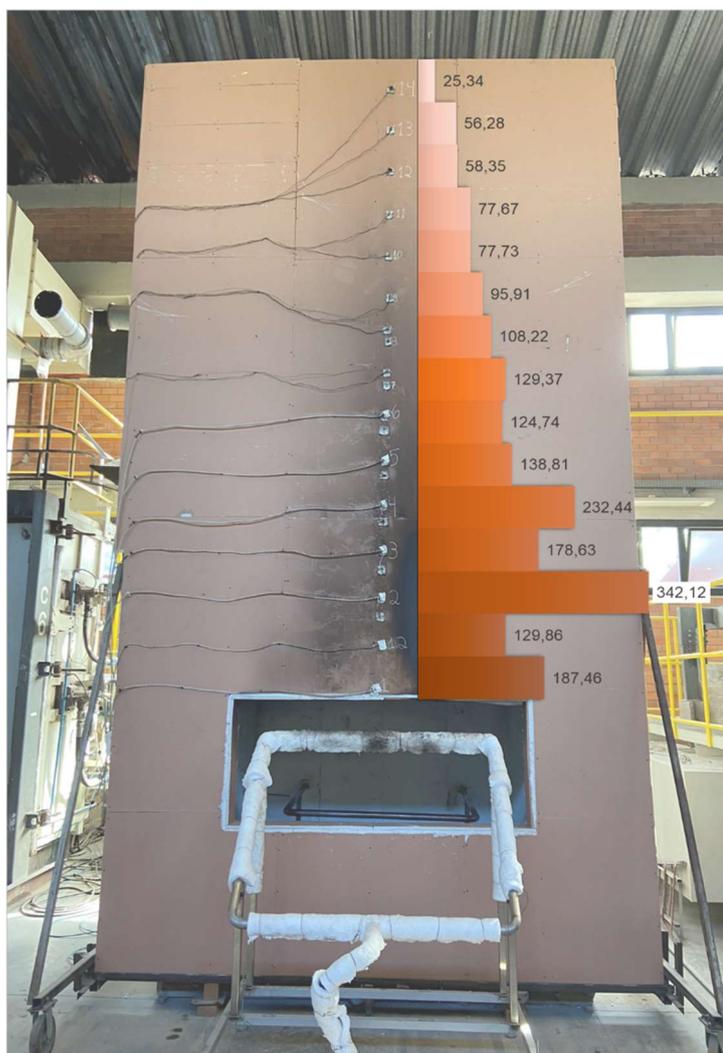
Um fator importante que pode ter interferido nas temperaturas externas medidas é a diferença de pé direito do aparato utilizado e o do proposto pelas normativas americanas. A referida diferença totaliza 37 centímetros, o que pode impactar na forma em que o *leapfrogging* ocorre ao longo da fachada e, assim, nas temperaturas incidentes. Vide resultados apresentados dos autores Schabowicz *et al.* (2022).

Assim, considerando que as temperaturas internas alcançaram as temperaturas de calibração, optou-se por reposicionar o queimador externo para que

o efeito *leapfrogging* não fosse tão impactante nos resultados medidos ao longo da face externa da amostra.

Com base nos resultados apresentados anteriormente, pôde-se verificar a existência do efeito do *leapfrogging* ao se analisar as temperaturas medidas nos termopares #02 e #03. O termopar #02, mesmo estando mais próximo da janela pela qual saía o fluxo de calor, teve temperatura inferior ao termopar #03 (vide Gráficos 4 e 5). Ainda, ao se analisar de forma global as temperaturas medidas, inclusive no primeiro intervalo (0 a 5 minutos), durante o qual apenas o queimador interno estava aceso, visualizou-se com ainda mais clareza este fenômeno, conforme apresentado na Figura 31, na qual consta sobreposta gráfico de temperatura (°C) e a imagem que localiza os termopares para melhor compreensão do desenvolvimento da temperatura em função da altura.

Figura 31 - Temperaturas médias no intervalo de 0 a 5 minutos



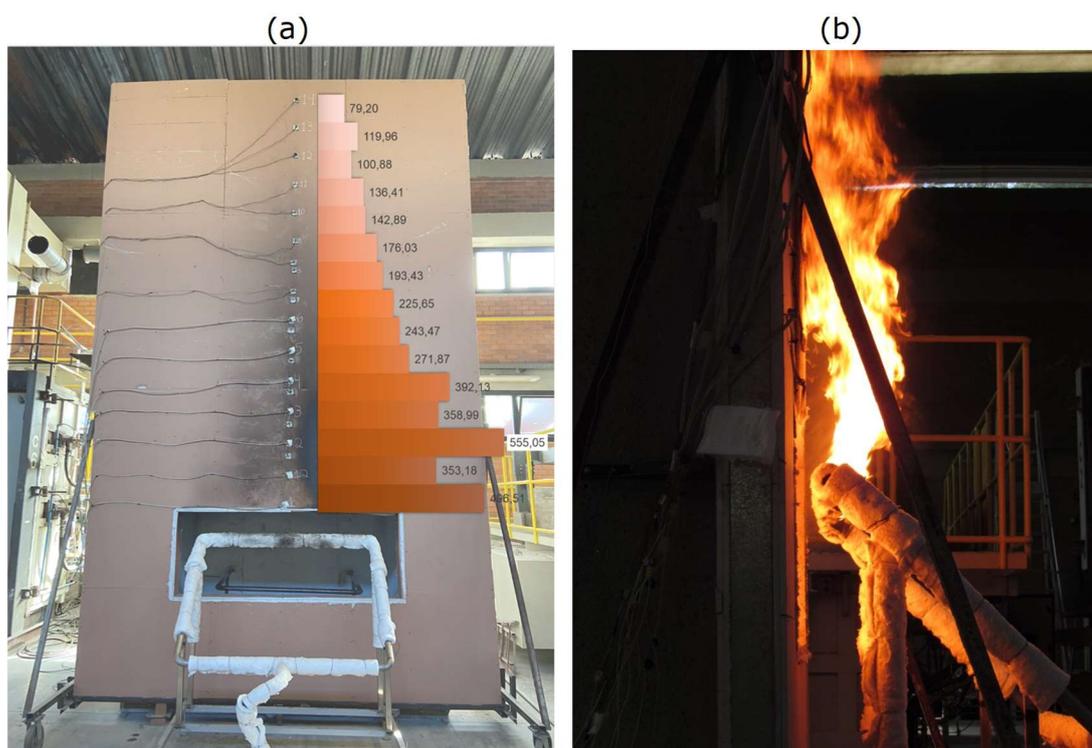
Fonte: Registrada pelo autor.

Interessante também indicar a existência de um segundo *leapfrogging* entre os termopares #03, #04 e #05, conforme constatado na Figura 31 acima, pelas diferentes temperaturas medidas, sendo que o termopar #04 teve temperatura inferior aos seus vizinhos. Esse resultado pode ter sido ocasionado por um pequeno distanciamento das chamas após incidirem na amostra.

Apesar de ainda ser etapa de calibração do equipamento, foi possível visualizar comportamento do fogo semelhante ao simulado pelos autores Giraldo Forero (2012) e Schabowic *et al.* (2022) com a ocorrência do *leapfrogging*.

Após a ignição do queimador externo, a partir do 5º minuto de calibração, foi possível verificar o aumento das temperaturas externas, conforme esperado, mas também a persistência do efeito *leapfrogging* de forma bastante clara entre os termopares #01, #02 e #03, conforme demonstrado e ilustrado na Fotografia 7.

Fotografia 7 – Intervalo de 5 a 10 minutos (a) *leapfrogging*; (b) registro fotográfico da ocorrência do *leapfrogging* durante a calibração

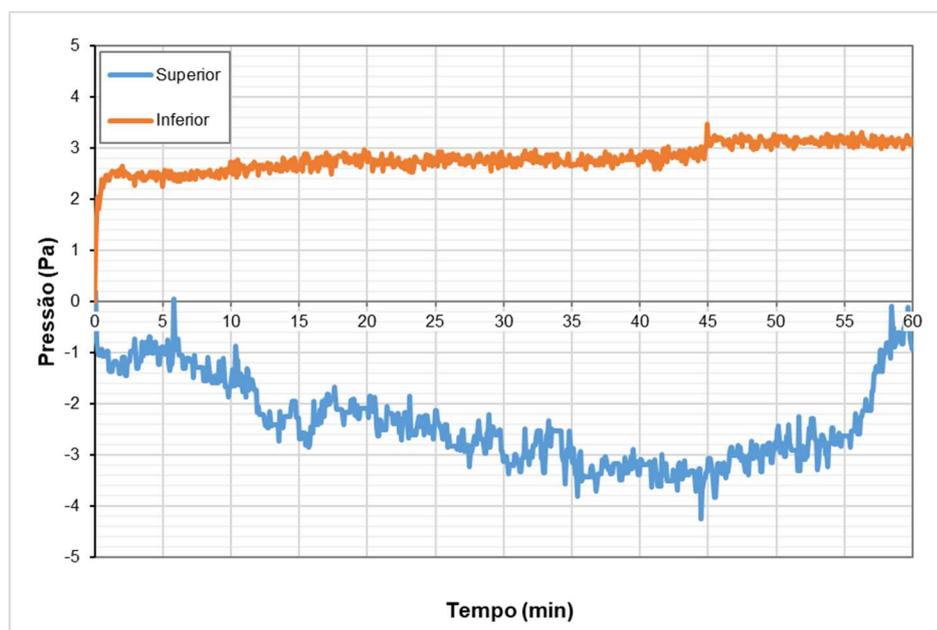


Fonte: Registrada pelo autor.

A Fotografia 7b ilustra o fogo do queimador externo se distanciando da amostra de calibração por conta do fluxo de ar quente saindo da parte interna da sala de testes. Caso não existisse este fluxo, as chamas permaneceriam rente à parede de

calibração. Este fluxo é comprovado pela diferença de pressão existente no interior do aparato que, apesar de não ser requisito para calibração, foi medido e consta ilustrado no Gráfico 11, quando foram medidas pressões negativas na parte superior da sala de testes (o que indica a saída do ar quente) e pressões positivas na parte inferior (indicando a entrada do ar frio).

Gráfico 11 – Pressão interna durante a calibração

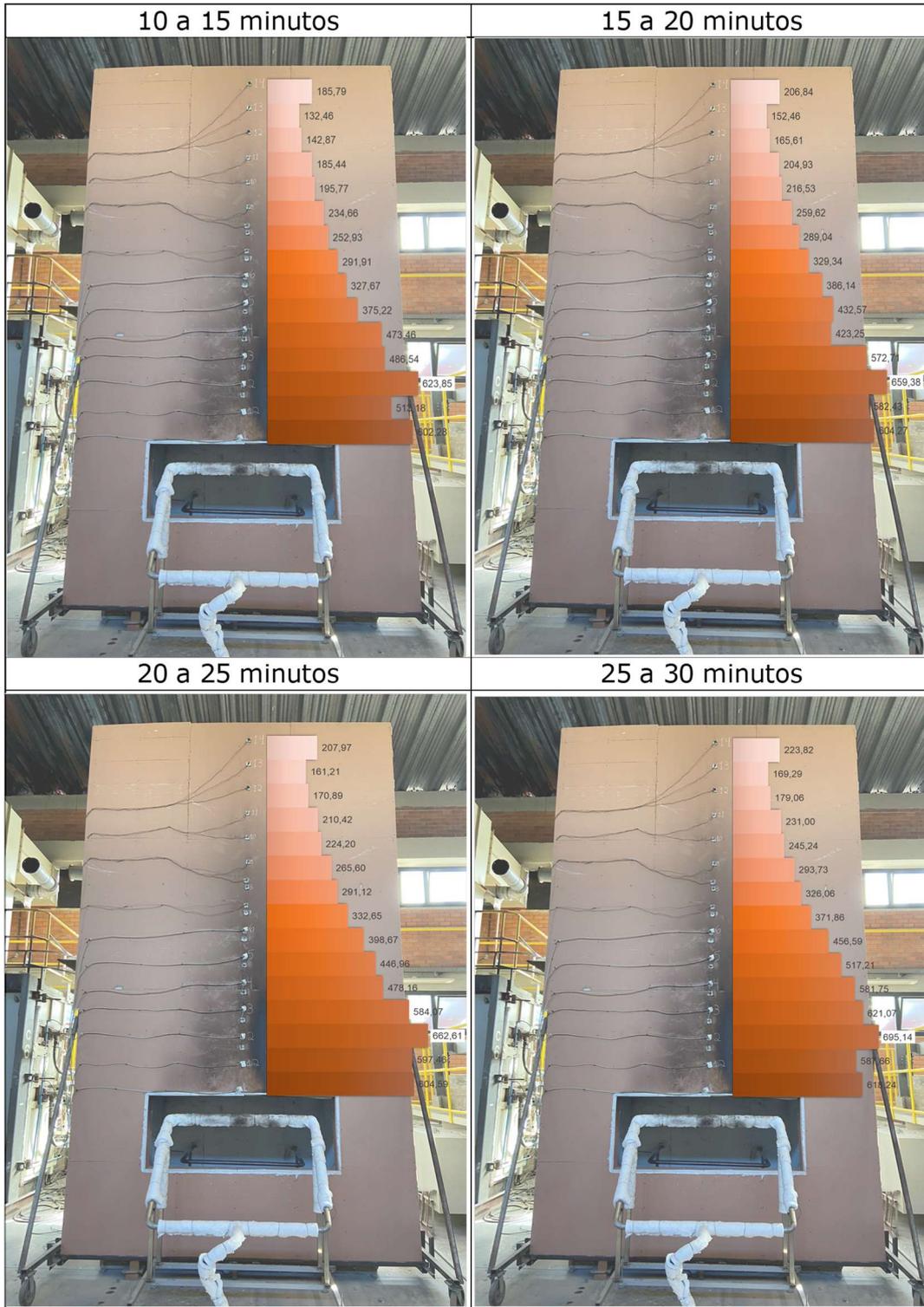


Fonte: Elaborado pelo autor.

As diferentes pressões constatadas e que interferem a favor da ocorrência do *leapfrogging* são corroboradas por Buchanan (2001), conforme Figura 20.

A partir do terceiro intervalo (10 a 15 minutos), houve maior emparelhamento das temperaturas externas, apesar de ainda existente e perceptível o efeito do *leapfrogging*, conforme Figura 32.

Figura 32 - Desenvolvimento da temperatura no decorrer dos intervalos



Fonte: Registrada pelo autor.

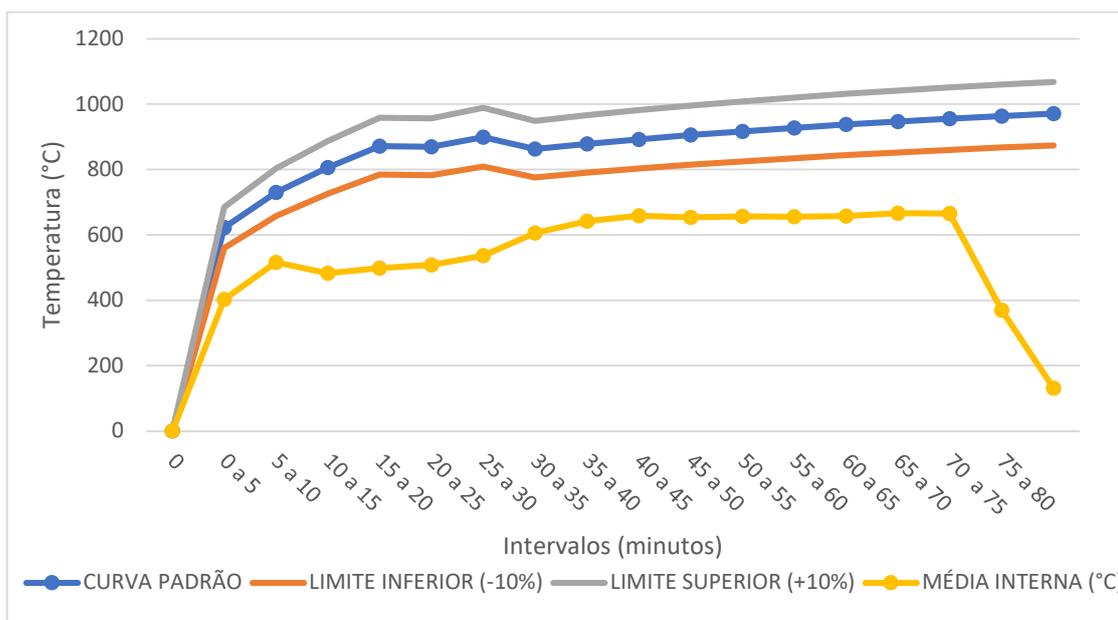
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO DA SELAGEM PERIMETRAL EM FACHADA PELE DE VIDRO

Com base na calibração realizada, foi ensaiado sistema de selagem perimetral em fachada pele de vidro e para apresentação e análise dos resultados. O item foi dividido em cinco subitens: temperaturas internas, temperaturas externas, temperaturas da selagem, fluxo de calor e discussão dos resultados.

4.2.1 Temperaturas Internas

Com os oitos termopares posicionados no interior da sala de testes (TP #16 ao #23) conforme Figura 28, foram medidas as temperaturas internas da sala de testes. Segundo a ASTM E2307 (2020b), apenas a média dos termopares TP#19 ao TP#23 serve para controle da temperatura interna, conforme Gráfico 12, no qual também consta a curva-padrão de temperatura estabelecida pela ASTM E2307 (2020b) e ASTM E2874 (2019). É possível visualizar que as temperaturas estiveram próximas de atender a curva padrão nos primeiros cinco minutos de ensaio, o que não ocorreu por conta da baixa capacidade de isolamento térmico do vidro utilizado.

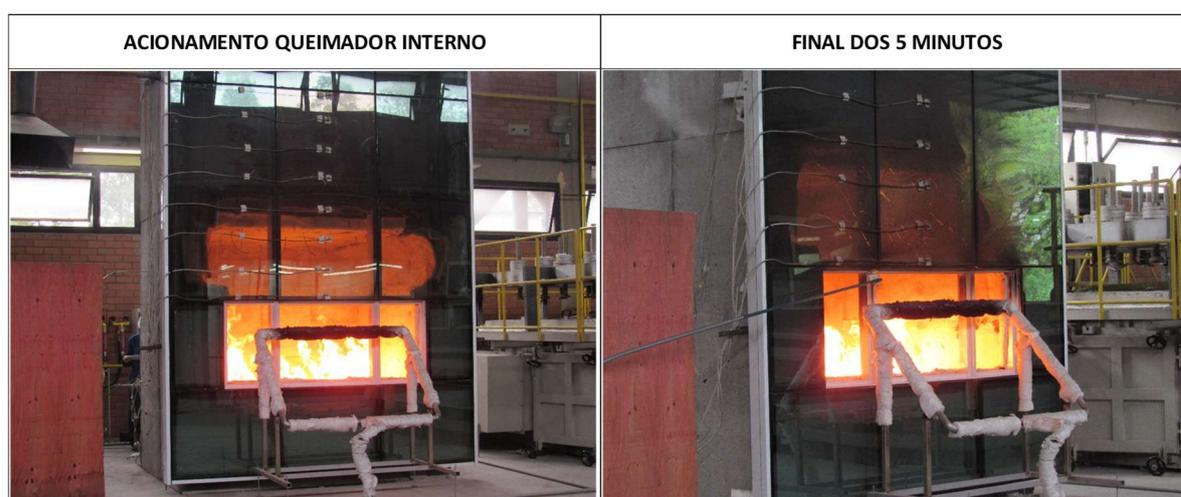
Gráfico 12 - Curva de temperatura média dos termopares posicionados centralizados na sala de testes (#19 ao #23)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do quinto minuto, foi acionado o queimador externo, que inclusive ocasiona aumento de temperatura interna. Entretanto, causou a quebra dos vidros e, por consequência, a perda de calor interno para o ambiente, dificultando o aumento da temperatura na sala de testes, conforme ilustrado nas Fotografia 8 e Fotografia 9. A queda de temperatura após setenta e cinco minutos de ensaio se deu pelo desligamento do equipamento.

Fotografia 8 - Quebra dos vidros no decorrer dos minutos iniciais do ensaio



Fonte: Registrada pelo autor.

Fotografia 9 - Quebra dos vidros após ignição do queimador externo

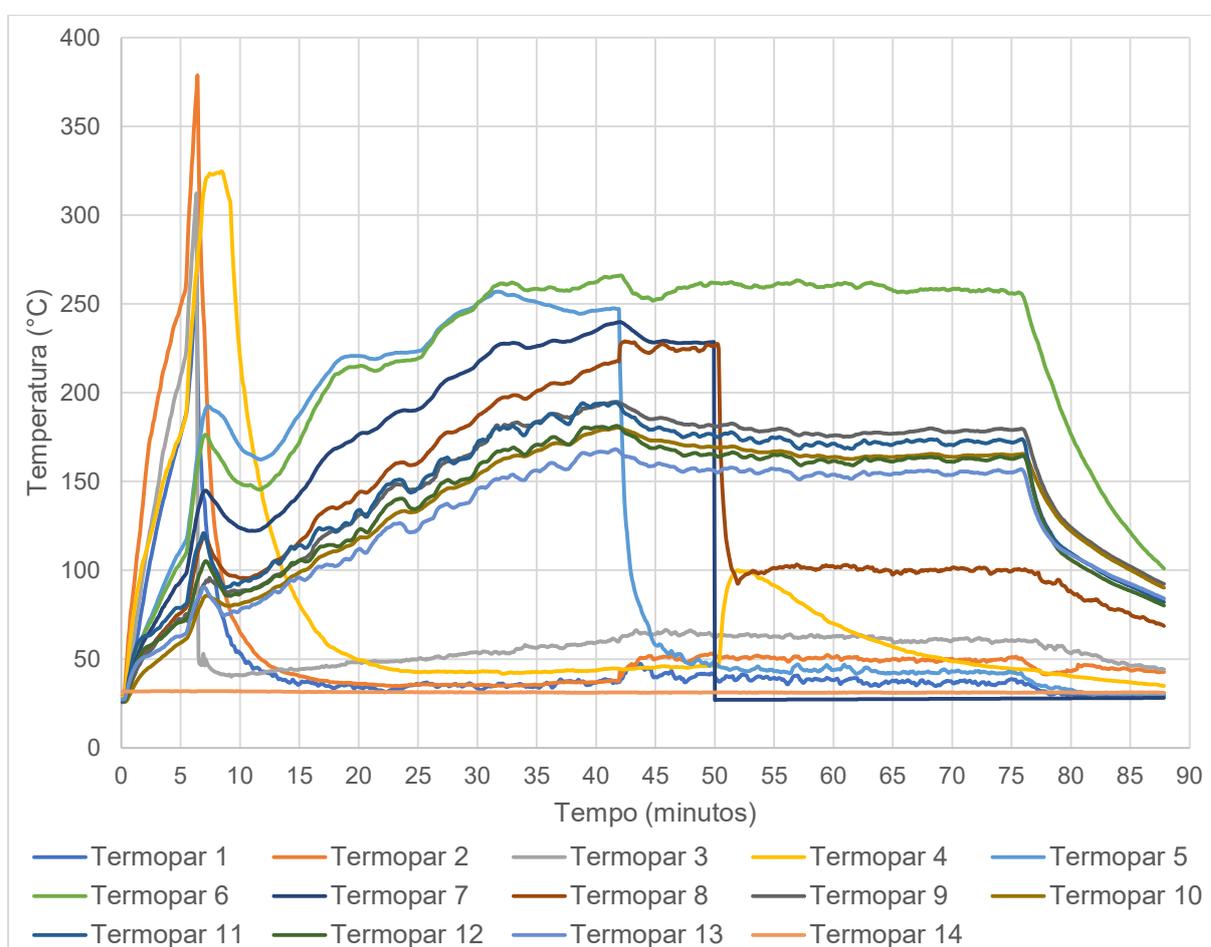


Fonte: Registrada pelo autor.

4.2.2 Temperaturas Externas

As temperaturas, ao longo da fachada, tiveram comportamento específico do sistema de fachada utilizado. Ao longo dos primeiros minutos, as temperaturas aumentaram drasticamente, principalmente nos termopares mais próximos da janela. A temperatura mais elevada constatada foi do termopar #02, seguido dos termopares #03 e #04. Após os primeiros cinco minutos, quando o queimador externo foi acendido, as temperaturas aumentaram ainda mais rápido, atingindo a temperatura máxima de 378 °C, até que aos seis minutos e meio, aproximadamente, o vidro central quebrou e os termopares do #01 ao #04 caíram, conforme ilustrado no Gráfico 13.

Gráfico 13 - Temperaturas ao longo da fachada



Fonte: Elaborado pelo autor.

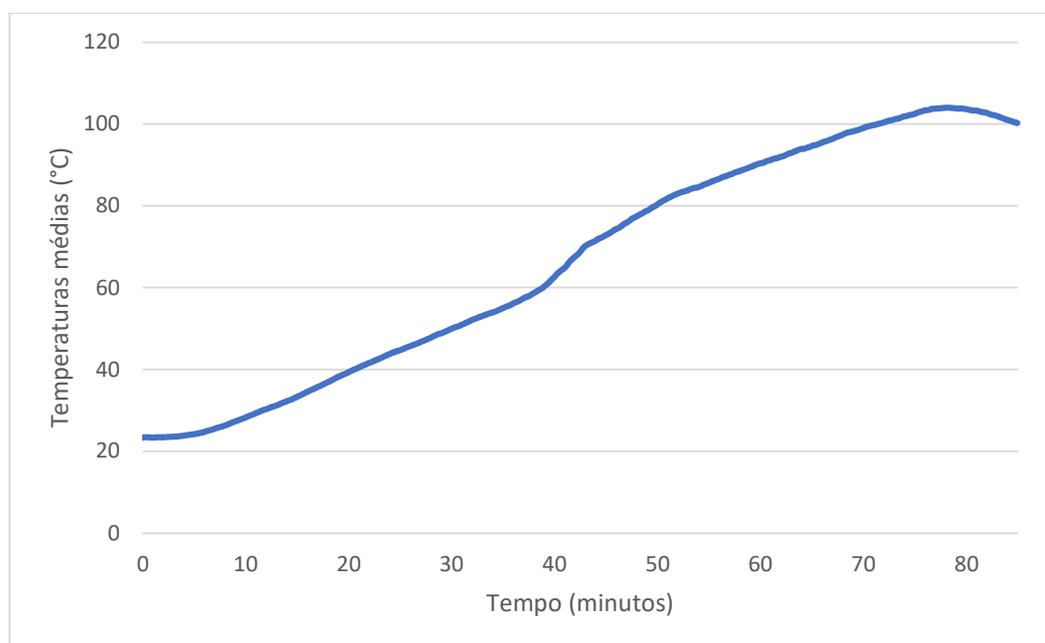
A quebra do vidro impactou a temperatura ao longo de toda fachada, visto que em todos os termopares houve queda da temperatura medida nos minutos seguintes ao ocorrido.

4.2.3 Temperaturas Selagem Face Não Exposta

A temperatura ambiente quando do início do ensaio era de 25°C. Logo, as temperaturas medidas não poderiam superar 206°C em nenhum momento e a média dos termopares não poderia atingir 164°C.

Durante o ensaio, a média dos termopares não atingiu em nenhum momento temperaturas superiores ou iguais a 164°C. A média máxima medida foi 104°C aos setenta e oito minutos e quinze segundos de ensaio. No Gráfico 14, é apresentado o crescimento da temperatura média ao longo do tempo, aumentando aproximadamente um grau Celsius a cada minuto de ensaio.

Gráfico 14 - Média das temperaturas na selagem resistente ao fogo



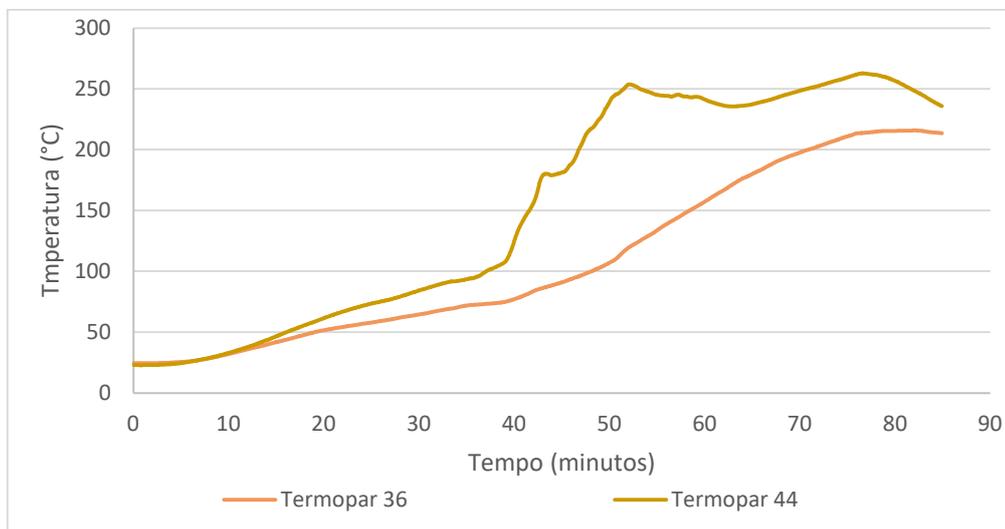
Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, é possível visualizar que, próximo ao minuto quarenta, houve aceleração do aumento da temperatura média. Isso se justifica pela quebra do vidro na altura da selagem, na região central da pele de vidro, possibilitando a passagem de chamas e gases quentes por fora da fachada, entre o vidro e a selagem.

Com relação à análise pontual de cada termopar, os termopares #36 e #44 atingiram as temperaturas máximas de 215,90°C e 262,86°C, respectivamente. O termopar #44, posicionado na selagem, entre os elementos metálicos de fixação, ultrapassou o limite de temperatura aos quarenta e sete minutos e quinze segundos, enquanto que o termopar #36 ultrapassou aos setenta e três minutos e cinco

segundos. No Gráfico 15 consta ilustrado o crescimento das temperaturas nos dois referidos termopares.

Gráfico 15 - Temperaturas dos termopares #36 e #44



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de não terem ultrapassado os limites estabelecidos pela ASTM E2307 (2020b) e ASTM E2874 (2019), outros termopares atingiram temperaturas que podem ser consideradas elevadas, acima de 100°C, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Termopares na selagem perimetral com temperaturas máximas acima de 100°C

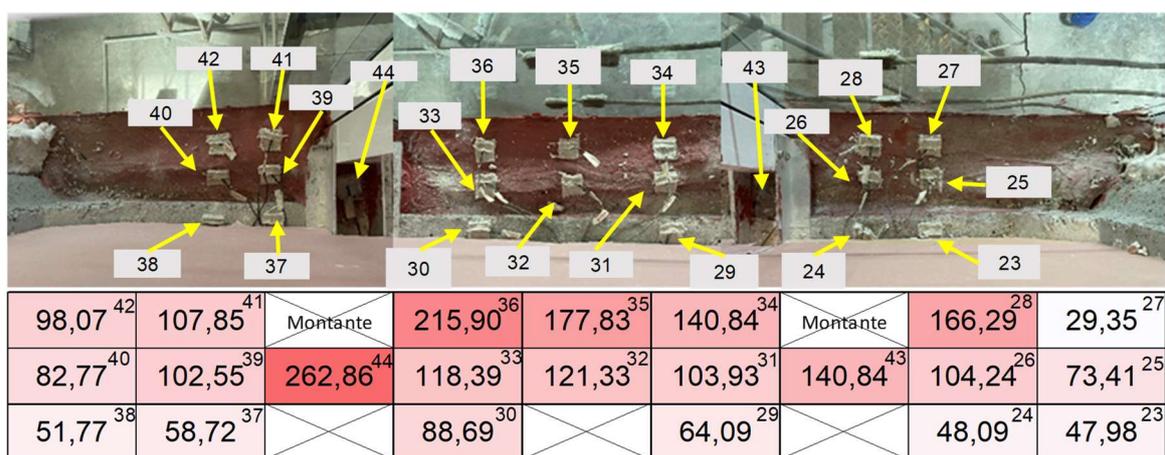
Termopar nº	Temperatura (°C)	Termopar nº	Temperatura (°C)
26	104,24	35	177,83
28	166,29	36	215,90
31	103,93	39	102,55
32	121,33	41	107,85
33	118,39	44	262,86
34	140,84		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Através dos resultados apresentados na Tabela 6 e considerando a Figura 33, pôde-se verificar que a temperatura mais elevada foi entre os elementos de fixação da pele de vidro, entre a região central e lateral esquerda da selagem, no termopar #44, e no termopar #36, posicionado na selagem central, próximo ao vidro, mas ao lado do #44.

Na Figura 33 é possível visualizar a temperatura máxima medida por cada termopar durante o ensaio e sua respectiva posição no local. Através dessa análise, conclui-se que o encontro entre a selagem e os montantes verticais são pontos frágeis para selagem, visto que necessitam de recortes dos materiais e de mais difícil instalação.

Figura 33 - Temperaturas (°C) máximas de cada termopar durante o ensaio

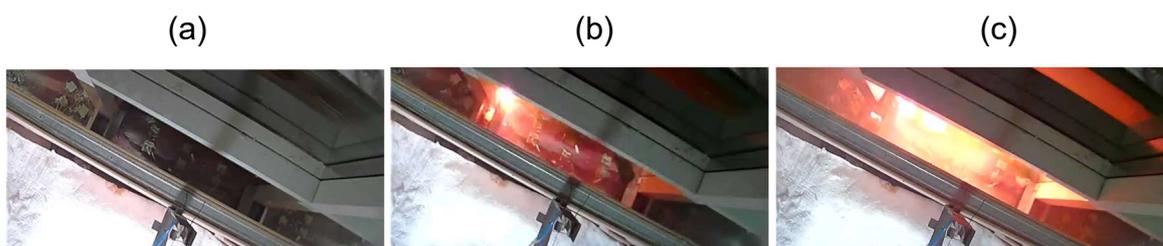


Fonte: Elaborada pelo autor.

Ainda com base nos dados constantes na Figura 33 acima, pôde-se verificar que as temperaturas foram aumentando quanto mais próximo do vidro da fachada, assim também em direção ao montante vertical esquerdo, onde se verificou a maior temperatura registrada.

Além das temperaturas constatadas, foi possível verificar que houve passagem de chamas pelo espaço gerado na quebra do vidro junto à selagem, assim como pela selagem instalada entre o sistema de fixação do montante central esquerdo, local onde foram constatadas as temperaturas mais elevadas, conforme Fotografia 10.

Fotografia 10 – Vista superior da selagem perimetral aos (a) 5 minutos; (b) 40 minutos; (c) 45 minutos



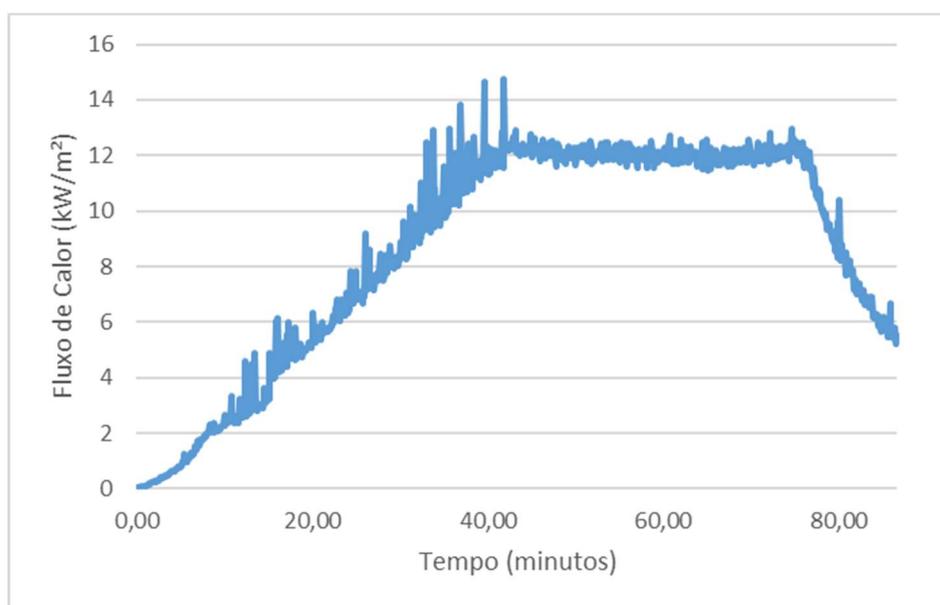
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.4 Fluxo de Calor

Durante a realização do ensaio, o fluxo de calor foi medido na parte superior do anteparo vertical. Apesar de não ser parâmetro para avaliação do sistema de selagem perimetral testado segundo as normas americanas, o fluxo de calor foi medido por ser importante forma de propagação de calor e, em uma situação de incêndio, ser capaz de propagar o fogo para outros prédios e pavimentos.

Assim, os valores medidos constam apresentados no Gráfico 16, que apresenta o crescimento durante os primeiros quarenta minutos, atingindo o valor máximo de 14,73 kW/m² aos quarenta e dois minutos de ensaio. Após a máxima, o fluxo de calor se manteve constante até o minuto setenta e sete, aproximadamente, com valor médio de 12,10 kW/m².

Gráfico 16 – Fluxo de calor ao longo do ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como as temperaturas internas e externas, o fluxo de calor se manteve constante a partir dos quarenta e cinco minutos de ensaio. Esse comportamento ocorreu por conta da redução de quebra dos vidros, mantendo constante a entrada do calor através da abertura existente.

Ainda, é possível que o fluxo de calor incidente tenha sido ainda maior, face à descentralização do ponto onde foram medidas as temperaturas mais elevadas com relação ao medidor de fluxo de calor posicionado, conforme ilustrado na Fotografia 10.

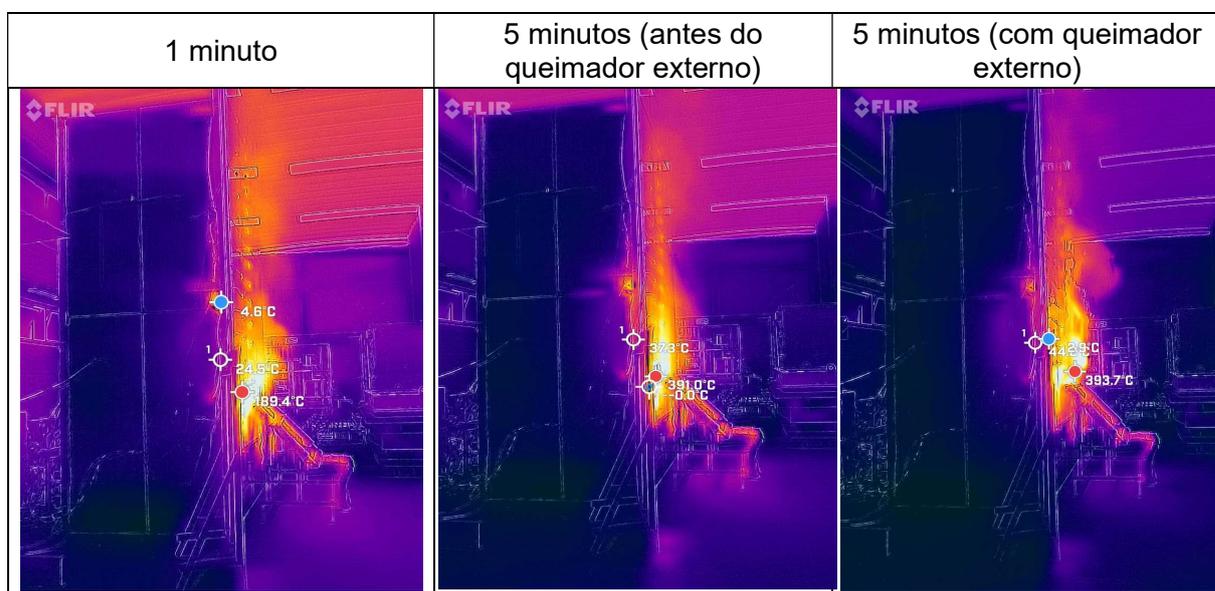
Assim, o fluxo de calor nos primeiros minutos após quebra do vidro junto à selagem, entre os quarenta e quarenta e cinco minutos de ensaio, deve ter sido superior ao efetivamente medido.

4.2.5 Discussão dos Resultados

Através da câmera termográfica instalada na lateral do ensaio, foi possível verificar o comportamento da chama ao longo da fachada, como incidiu o efeito do *leapfrogging* durante o ensaio e as diferentes conformações da língua de fogo por conta da quebra do vidro. Durante os primeiros cinco minutos, foi visualizado apenas o calor oriundo do queimador interno, gerando região de ar quente saindo pela janela, conforme ilustrado na Figura 34.

Após a ignição do queimador externo, houve a incidência direta das chamas deste queimador ao longo da fachada, mantendo o calor paralelo à amostra, mas com temperaturas mais elevadas.

Figura 34 – *Leapfrogging* durante os primeiros 5 minutos de ensaio

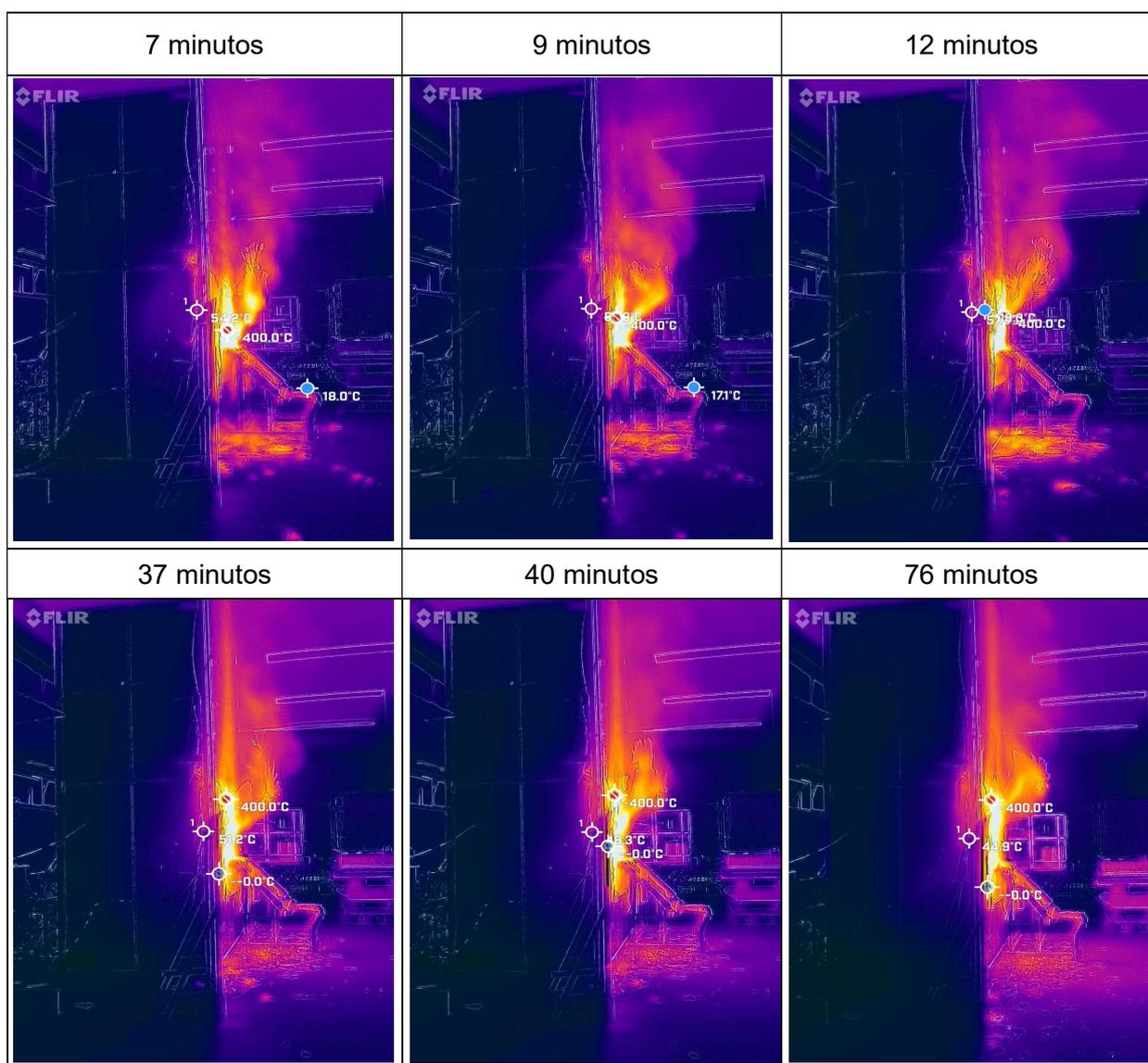


Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a quebra dos vidros acima da janela, tanto a nuvem de ar quente como as chamas oriundas do queimador externo passaram a ter uma conformação inclinada em relação à fachada. Esse fato impactou nas temperaturas incidentes ao longo da fachada, visto que o fogo e ar quente se dispersaram no exterior do aparato, conforme Figura 35. Se comparadas as Figura 34 e Figura 35, percebe-se que a área aquecida

pelas chamas e o ar quente duplicou em frente à amostra após a quebra dos vidros. Inclusive, em alguns momentos, ocorreu a separação de nuvem aquecida por conta do distanciamento da fachada, podendo-se constatar uma região mais aquecida rente a esta e outra descolada dela, conforme Figura 35 aos 7, 9 e 12 minutos.

Figura 35 – *Leapfrogging* durante o ensaio após ignição do queimador externo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o andamento do ensaio e a progressão da quebra dos vidros da amostra e, por consequência, aumento da área e altura livre para saída de ar quente e entrada de ar frio, houve movimentação vertical da linha neutra (conforme Buchanan (2001), vide Figura 20, e Fotografia 11). O comportamento do fogo do queimador externo foi diretamente afetado, sendo levado pelo fluxo de ar frio para dentro da sala de testes para posteriormente sair pelo fluxo de ar quente, conforme ilustrado na Fotografia 11.

Fotografia 11 – Fogo do queimador externo entrando na sala de testes



Fonte: Registrada pelo autor.

O comportamento descrito acima se justifica também pela pressão interna medida no decorrer do ensaio. Diferentemente do que foi constatado durante a calibração, a parte superior da sala de testes apresentou pressão positiva (indicando a entrada de ar frio), ocasionando o comportamento ilustrado na Fotografia 11.

Por ser um vidro laminado com PVB entre as placas, foi constatado que as placas externas, além de se quebrarem pela alta temperatura, se deslocaram pelo PVB derretido e caindo, o que acelerou o deslocamento dos vidros. Inclusive, houve gotejamento do PVB.

Considerando os resultados apresentados com relação às temperaturas medidas na superfície da selagem perimetral, os termopares #36 e #44 superaram a temperatura máxima permitida, atingindo 215,90°C e 262,86°C, respectivamente. Por mais que ambos termopares tenham atingido as referidas temperaturas após a quebra do vidro central na altura da selagem perimetral, pode-se dizer que o sistema de selagem, da forma em que foi instalado e considerado, não foi capaz de barrar a passagem das chamas e gases quentes para o pavimento superior.

O anteparo vertical instalado teve o papel de garantir que as chamas que passaram pela selagem perimetral não adentrassem para a sala de observação. As temperaturas medidas na parte superior e central do anteparo vertical não superaram 56°C (termopares 45 e 46). Entretanto, o foco das maiores temperaturas na selagem perimetral não foi centralizado, o que deve ter ocasionado temperaturas superiores às medidas.

Conforme apresentado no subitem 4.2.4 Fluxo de Calor, o valor máximo de fluxo de calor constatado foi de 14,73 kW/m² aos quarenta e dois minutos de ensaio, e, após a máxima, este se manteve constante até o minuto setenta e sete, aproximadamente, com valor médio de 12,10 kW/m². Considerando que a ignição da madeira poderia ocorrer a partir de 12,5 kW/m² de forma não espontânea (BARNETT, 1989) e o algodão ignizaria a partir de 10 kW/m² (PESIC *et al.*, 2017), conforme já descrito no subitem 2.2.3 Meios de Propagação do Fogo nas Fachadas, pode-se inferir a provável ignição de uma cortina de algodão ou de material semelhante que poderia ser instalado em uma situação real de incêndio em edificações, assim como revestimento ou móvel em madeira.

Ainda, os resultados obtidos de fluxo de calor podem ter sido ainda maiores visto que o sensor de fluxo de calor estava centralizado no anteparo vertical e que o foco das maiores temperaturas na selagem perimetral foi junto ao montante vertical (não centralizado), conforme ilustrado na Fotografia 10. Logo, a ignição de materiais de revestimento se torna ainda mais provável, visto que o fluxo de calor incidente no ponto de maiores temperaturas na selagem perimetral deve ter sido ainda maior do que o efetivamente medido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, o presente estudo consolidou a importância da realização de ensaios em escala real para discussão técnica de temas que necessitam de norma técnica brasileira. Foi executado ensaio de sistema de fachada envidraçada em escala real, com selagem perimetral e anteparo vertical de 1,20 metro, simulando dois pavimentos subsequentes. A execução seguiu os preceitos das instruções técnicas existentes.

A segurança contra incêndio necessita de ensaios específicos para sistemas construtivos que garantam a segurança das edificações e seus usuários em situações de incêndio para que sejam estabelecidas as técnicas construtivas mais adequadas. Testes e ensaios em sistemas com escala reduzida e simulações computacionais são imprescindíveis para a composição do conhecimento técnico, porém também devem servir de subsídios para a realização de ensaios em escala real de forma direcionada e específica, para assim comprovar a eficácia de uma solução técnica.

O presente estudo apresentou a importância da se ter visão global sobre propagação externa do fogo em fachadas para entendimento do real desempenho de sistema de fachada envidraçada quando exposta ao fogo, face a variação do comportamento das chamas e calor por conta da interação dos diferentes elementos constituintes das fachadas quando expostos às altas temperaturas de um incêndio.

Os resultados do ensaio realizado demonstram que a selagem perimetral instalada manteve a compartimentação vertical até o momento em que houve a quebra do vidro junto à selagem, enquanto que o anteparo vertical de 1,20 metro teve a finalidade de evitar a entrada direta do fogo no pavimento superior. Após a quebra do vidro, o sistema composto por selagem perimetral resistente ao fogo e o anteparo vertical não foram capazes de garantir a compartimentação entre os pavimentos.

Além das temperaturas medidas na superfície superior da selagem perimetral, que ultrapassaram os limites normativos, o fluxo de calor se mostrou parâmetro imprescindível para a análise global de segurança contra incêndio para o sistema ensaiado. Com base nos resultados obtidos, o fluxo de calor medido já poderia ter ignizado materiais de revestimento e decoração, mesmo que as temperaturas medidas na parte superior do anteparo vertical de 1,20 metro não fossem elevadas.

Ademais, a mudança de geometria da abertura na fachada pele de vidro, que ocasionou o aumento de área de ventilação no decorrer do ensaio, tem capacidade

de impactar diretamente no comportamento do fogo e na sua propagação ao longo da face externa da amostra. Após a quebra do vidro, o fogo passou a se distanciar da fachada ao sair pela abertura, diminuindo as temperaturas na face externa e na selagem perimetral.

O fluxo de calor apareceu no presente estudo como parâmetro fundamental a ser considerado, ainda mais importante em fachadas pele de vidro com vidros comuns por conta da quebra e baixa capacidade de absorver a radiação emitida. Assim, o desempenho do sistema ensaiado restou comprometido pela quebra do vidro e, visto que o anteparo vertical se encontra distanciado da fachada, gera efeito chaminé entre o elemento de compartimentação vertical e o sistema de vedação externo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à existência de diferentes sistemas de segurança contra incêndio e formas de compartimentação vertical em fachadas, propõem-se os seguintes temas para que haja a continuidade da linha de pesquisa deste trabalho:

- a) Realizar ensaios considerando vigas de bordo, de forma que altere a distribuição do anteparo vertical de 1,20 metro, face ao impacto identificado no *leapfrogging* de forma a definir a situação mais crítica;
- b) Considerar projeções horizontais de 90 centímetros, tanto de forma independente como em conjunto com o anteparo vertical, e analisar o desempenho dos sistemas para compartimentação vertical;
- c) Considerar outros sistemas de selagens perimetrais que existem no mercado internacional, já ensaiados pela ASTM E2307 (2020b) e ASTM E2874 (2019) para fins de verificar o impacto do pé direito no desempenho dos sistemas;
- d) Ensaiar no aparato desenvolvido sistemas de selagem perimetral testados conforme as normas americanas e conforme BS EM 1364-4 (2014) e comparar os resultados obtidos;
- e) Analisar outros sistemas de fachadas, seja pele de vidro ou outros tipos de revestimento, a fim de verificar a incidência do *leapfrogging* e a capacidade de manter a compartimentação vertical.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM). **ASTM E119**: standard test methods for fire tests of building construction and materials. West Conshohocken, Pennsylvania, U.S: ASTM, 2020a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM). **ASTM E2307**: standard test method for determining fire resistance of perimeter fire barriers using intermediate-scale, multi-story test apparatus. West Conshohocken, Pennsylvania, U.S: ASTM, 2020b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM). **ASTM E2874**: Standard test method for determining the fire-test response characteristics of a building spandrel-panel assembly due to external spread of Fire. West Conshohocken, Pennsylvania, U.S: ASTM, 2019.

ANDERSON, J. *et al.* Fire dynamics in façade fire tests: measurement, modeling and repeatability. **Applications of Structural Fire Engineering**, Prague, p. 1-6, June 2017. Disponível em: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/asfe/article/view/3363>. Acesso em: 19 set. 2022.

ANDREIS, C.; BESEN, P.; WESTPHAL, F. S. Desempenho energético de fachadas envidraçadas em climas brasileiros. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. **Anais** [...]. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014. p. 926–935. Disponível em: http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/paper_628.pdf. Acesso em: 24 jul. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7199**: vidros na construção civil: projeto, execução e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 10821-1**: esquadrias para edificações parte 1: esquadrias externas e internas: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14697**: vidro laminado. Rio de Janeiro: ABNT, 2001b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14925**: elementos construtivos envidraçados resistentes ao fogo para compartimentação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15200**: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15575**: edificações habitacionais - desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15575-4**: edificações habitacionais - desempenho - parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. 5. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16015**: vidro insulado: características, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16626**: classificação da reação ao fogo de produtos de construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16951**: reação ao fogo de sistemas e revestimentos externos de fachadas - Método de ensaio, classificação e aplicação dos resultados de propagação do fogo nas superfícies das fachadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16965**: ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos - diretrizes gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 295**: vidro aramado. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BARNETT, C. R. Fire separation between external walls of buildings. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE SAFETY SCIENCE, 2., 1989, Tokyo. **Fire safety science**: proceedings of the second international symposium. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. p. 841–850. Disponível em: https://publications.iafss.org/publications/fss/2/841/view/fss_2-841.pdf. Acesso em: 25 jul. 2021.

BOLINA, F. L. *et al.* Avaliação da resistência ao fogo de paredes maciças de concreto armado. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 291–305, 2015.

BONNER, M.; REIN, G. Flammability and multi-objective performance of building façades: Towards optimum design. **International Journal of High-Rise Buildings**, Seoul, v. 7, n. 4, p. 363–374, 2018.

BRASIL. **Lei nº 13.425, de 30 de março de 2017**. Estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público; altera as Leis nº s 8.078, de 11 de setembro de 1990, e 10.406, de 10 de janeiro de 2002 – Código Civil; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13425.htm. Acesso em: 06 mar. 2021.

BRITEZ, C.; CARVALHO, M.; HELENE, P. Ações e efeitos deletérios do fogo em estruturas de concreto. Uma breve revisão. **Revista ALCONPAT**, Mérida, México, v. 10, n. 1, p. 1–21, dez. 2019.

BRITISH STANDARD INSTITUTION (BSI). **BS EN 1364-3:2014**: fire resistance tests for nonloadbearing elements: part 3: curtain walling - Full configuration (complete assembly). [London]: BSI, 2014a.

BRITISH STANDARD INSTITUTION (BSI). **BS EN 1364-4:2014**: fire resistance tests for nonloadbearing elements: part 4: curtain walling - part configuration. [London]: BSI, 2014b.

BUCHANAN, A. **Fire engineering design guide**. Christchurch: University of Canterbury, 2001.

CAMPOS, K. F. **Desenvolvimento de sistema de fixação de fachada ventilada com porcelanato de fina espessura**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/95496/290695.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 maio 2021.

CANCELLIERE, P. *et al.* A new test method to determine the fire behavior of façades with etic system. **Fire and Materials**, London, v. 45, p. 624–637, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/fam.2886>. Acesso em: 19 set. 2022.

CARLSSON, E. **External fire spread to adjoining buildings**: a review of fire safety design guidance and related research. Lund: Lund University, 1999.

CHEN, K.; LU, W. Design for manufacture and assembly oriented design approach to a curtain wall system: A case study of a commercial building in Wuhan, China. **Sustainability (Switzerland)**, Basel, v. 10, n. 7, art. 2211, 2018.

CHEN, K. M. G.; VICTOR, F. Curtain wall firestop review of code requirement and design issues. **GHL Consultants**: newsletter, Vancouver, Oct. 2012. Disponível em: https://ghl.ca/wp-content/uploads/shared/2012F_-_Curtain Wall Firestop.pdf. Acesso em: 23 maio 2021.

CHOW, L. Spread of smoke and heat along narrow air cavity in double-skin façade fires. **Thermal Science**, Belgrade, v. 18, p. S405–S416, 2014. Suppl.2

CHOW, W. K. *et al.* Experimental study on smoke movement leading to glass damages in double-skinned façade. **Construction and Building Materials**, Washington, DC, v. 21, n. 3, p. 556–566, 2007.

CLARKE III, F. B.; OTTOSON, J. Fire death scenarios and fire safety planning. **Fire Journal**, [Boston, Mass.], v. 70, n. 3, p. 5, 1976.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) -- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-04092008-155911/pt-br.php>. Acesso em: 26 jun. 2021.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais**. São Paulo: USP, 2003. Trabalho apresentado ao Símpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, 5., 2003, São Paulo.

DEL CARLO, U. A segurança contra incêndio no mundo. *In*: SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 1–7.

DŽOLEV, I.; LABAN, M.; DRAGANIĆ, S. Survey based fire load assessment and impact analysis of fire load increment on fire development in contemporary dwellings. **Safety Science**, Amsterdam, v. 135, art. 105094, Mar. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925753520304914>. Acesso em: 20 maio 2021.

EMMONS, H. W. The needed fire science. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE SAFETY SCIENCE, 1., 1985. **Fire safety science: proceedings of the first international symposium**. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1986. p. 33–53. Disponível em: https://publications.iafss.org/publications/fss/1/33/view/fss_1-33.pdf. Acesso em: 25 jul. 2021.

FELIX, P. M. A. C.; ONO, R.; OLIVEIRA, F. L. Aplicação dos requisitos de proteção passiva para o cross laminated timber - CLT segundo a ABNT NBR 15575 : 2021. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 17, n. 4, p. 79-99, 2022. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/196689/189697>. Acesso em: 28 dez. 2022.

G1 RS. Incêndio em boate provoca pânico e mortes em Santa Maria, no RS. *In*: G1: Rio Grande do Sul. [Porto Alegre], 27 jan. 2013. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2013/01/incendio-em-boate-provoca-panico-e-mortes-em-santa-maria-no-rs.html>. Acesso em: 06 mar. 2021.

GIRALDO FORERO, M. P. **Evaluación del comportamiento del fuego y protección contra incendios en diversas tipologías de fachadas**. 2012. Tese (Doctoral) -- Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2012. Disponível em: <https://www.tesisenred.net/handle/10803/113767#page=1>. Acesso em: 23 jun. 2021.

GIRALDO FORERO, M. P. Propagación del fuego por fachada. *In*: ESTUDIO sobre la problemática generada por la propagación de incendios en fachadas de edificios. Barcelona: Col legi/Associació d'Enginyers Industrials de Catalunya, 2019. p. 31–59. Disponível em: <https://www.eic.cat/gfe/docs/21223.PDF>. Acesso em: 23 jun. 2021.

GANDHI, P. *et al.* Performance of glass-ACP façade system in a full-scale real fire test in a G+2 structure. **Procedia Engineering**, [Amsterdam], v. 210, p. 512–519, 2017.

GIL, A. *et al.* Comparative study of concrete panels' fire resistance. **ACI Materials Journal**, Detroit, Mich., v. 114, n. 5, p. 755–762, 2017.

GUNASEKARAN, U.; PREMALATHA, E.; MALINI, T. A. Facades of tall buildings: state of the art facades of tall buildings: state of the art. **Modern Applied Science**, Ontario, v. 4, n. 12, p. 116–125, 2010.

GYPSUM ASSOCIATION (GA). **Fire resistance design manual**: sound control: gypsum systems. 21st ed. Orland Park, IL: GA, 2015

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 834**: 1999: fire-resistance tests: elements of building construction: part 1: general requirements. Geneva: ISO, 1999.

Jl, J. *et al.* Numerical studies on smoke spread in the cavity of a double-skin façade. **Journal of Civil Engineering and Management**, [Abingdon, UK], v. 22, n. 4, p. 470-479, 2016.

KINOWSKI, J.; SEDLAK, B.; SULIK, P. Large glazing in curtain walls – study on impact of fixing methods on fire resistance. **MATEC Web of Conferences**, v. 46, art. 05004, 2016. Disponível em: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/09/mateconf_05004.pdf. Acesso em: 20 abr. 2021.

KONECKI, M.; GAŁAJ, J. Flame transfer through the external walls insulation of the building during a fire. **Procedia Engineering**, [Amsterdam], v. 172, p. 529–535, 2017.

LAW, M. Fire safety of external building elements the design approach. **Engineering Journal**, [Montreal], v. 15, p. 59-74, 1978.

MAKEPEACE, C. *et al.* **Glass and metal curtain walls best practice guide building technology**. Canada: Public Works and Government Services Canada, 2004.

MESQUITA, L.; SOUZA, F.; BARIFOUSE, R. De luxo modernista a ocupação precária: a história de mais de meio século do prédio que desabou em São Paulo. **BBC Brasil**, Londres, 1 maio 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-43963439>. Acesso em: 10 maio 2021.

MITIDIERI, M. L. O comportamento dos materiais e componentes construtivos diante do fogo - reação ao fogo. *In*: SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 55–75.

MONTANO, P. F.; BASTOS, H. B. A indústria de vidro plano: conjuntura atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 38, p. 265-290, set. 2013.

MURILLO A., M. *et al.* Analysis of the influence of thickness on fire reaction performance in polyisocyanurate core sandwich panels. **Journal of Materials Research and Technology**, [S. l.], v. 9, n. 5, p. 9487–9497, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420314897>. Acesso em: 22 jun. 2021.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). **NFPA 5000®: Building construction and safety code®**. Quincy, MA: NFPA, 2021.

NEGRISOLO, W. **Arquitetando a segurança contra incêndio**. 2011. Tese (Doutorado em Arquitetura) -- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-30052012-155902/publico/Arquitetando_a_Seguranca_Contra_Incendio_Rv.pdf. Acesso em: 22 nov. 2022.

NGUYEN, K. *et al.* Performance of modern building facades in fire: a comprehensive review. **Electronic Journal of Structural Engineering**, [Melbourne], v. 16, n. 1, p. 69-86, 2016. Disponível em: <https://ejsei.com/EJSE/article/view/212/250>. Acesso em: 14 maio 2021.

OHLEMILLER, T. J. Modeling of smoldering combustion propagation. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 11, n. 4, p. 277–310, 1985.

OLESZKIEWICZ, I. Fire exposure to exterior walls and flame spread on combustible cladding. **Fire Technology**, Boston, v. 26, n. 4, p. 357–375, 1990. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01293079>. Acesso em: 20 maio 2021.

OLESZKIEWICZ, I. **Heat transfer from a window fire plume to a building facade**. National Research Council of Canada: Ottawa, 1989. Disponível em: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=f701b2ee-3980-47f8-9cfa-e23e4264b212>. Acesso em: 02 jul. 2021.

OLIVEIRA, L. A. **Metodologia para desenvolvimento de projeto de fachadas leves**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-08092010-125813/publico/Tese_Luciana_Alves_de_Oliveira.pdf. Acesso em: 23 jun. 2021.

ONO, R. Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 97–113, 2008.

ONO, R.; VENEZIA, A. P. P. G.; VALENTIN, M. V. Arquitetura e urbanismo. *In*: SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 123–134.

PATTERSON, J. **Simplified design for building fire safety**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

PESIC, D. J. *et al.* Simulation of fire spread between residential buildings regarding safe separation distance. **Tehnicki Vjesnik**, [S. l.], v. 24, n. 4, p. 1137–1145, 2017.

PHAN, L. T. **Fire performance of high-strength concrete**: a report of the state-of-the-art. Gaithersburg, MD.: National Institute of Standards and Technology, 1996.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Segurança Pública. Comando do Corpo de Bombeiros. Divisão Técnica de Prevenção de Incêndio e Investigação. **Resolução Técnica CBMRS nº 02, de 19 de dezembro de 2014**. Terminologia aplicada a segurança contra incêndio. Padroniza os termos e definições utilizadas na legislação de segurança contra incêndio do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CBMRS, 2014.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Segurança Pública. Comando do Corpo de Bombeiros. Divisão Técnica de Prevenção de Incêndio e Investigação. **Resolução Técnica CBMRS nº 04, de 12 de abril de 2022**. Isolamento de riscos. Estabelece as condições mínimas necessárias para o dimensionamento e execução do isolamento de riscos nas edificações e áreas de risco de incêndio, atendendo ao previsto na Lei Complementar n.º 14.376, de 26 de dezembro de 2013, e suas alterações e Decreto Estadual n.º 51.803, de 10 de setembro de 2014, e suas alterações. Porto Alegre: CBMRS, 2022.

RODRIGUES, E. E. C. **Análise da eficiência dos sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/142695>. Acesso em: 04 abr. 2021.

RODRIGUES, E. E. C. **Sistema de gestão da segurança contra incêndio e pânico nas edificações**: fundamentação para uma regulamentação nacional. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/142695>. Acesso em: 04 abr. 2021.

SÃO PAULO. Secretaria da Segurança Pública. Polícia Militar do Estado de São Paulo. Corpo de Bombeiros. **Instrução técnica nº 02/2019**: conceitos básicos de segurança contra incêndio. São Paulo: Corpo de Bombeiros, 2019a. Disponível em: http://www.ccb.policiamilitar.sp.gov.br/dsci_publicacoes2/_lib/file/doc/IT-02-19.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

SÃO PAULO. Secretaria da Segurança Pública. Polícia Militar do Estado de São Paulo. Corpo de Bombeiros. **Instrução técnica nº 03/2019**: terminologia de segurança contra incêndio. São Paulo: Corpo de Bombeiros, 2019b. Disponível em: http://www.ccb.policiamilitar.sp.gov.br/dsci_publicacoes2/_lib/file/doc/IT-02-19.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

SÃO PAULO. Secretaria da Segurança Pública. Polícia Militar do Estado de São Paulo. Corpo de Bombeiros. **Instrução técnica nº 07/2019**: separação entre edificações (isolamento de risco). São Paulo: Corpo de Bombeiros, 2019c. Disponível em: http://www.ccb.policiamilitar.sp.gov.br/dsci_publicacoes2/_lib/file/doc/IT-07-19.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

SÃO PAULO. Secretaria da Segurança Pública. Polícia Militar do Estado de São Paulo. Corpo de Bombeiros. **Instrução técnica nº 08/2019**: resistência ao fogo dos elementos de construção. São Paulo: Corpo de Bombeiros, 2019d. Disponível em: http://www.ccb.policiamilitar.sp.gov.br/dsci_publicacoes2/_lib/file/doc/IT-08-19.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

SÃO PAULO. Secretaria da Segurança Pública. Polícia Militar do Estado de São Paulo. Corpo de Bombeiros. **Instrução técnica nº 09/2019**: compartimentação horizontal e compartimentação vertical. São Paulo: Corpo de Bombeiros, 2019e. Disponível em: http://www.ccb.policiamilitar.sp.gov.br/dsci_publicacoes2/_lib/file/doc/IT-09-19.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

SCHABOWICZ, K. *et al.* Numerical analysis of storey-to-storey fire spreading. **Archives of Civil Engineering**, Warsaw, v. 68, n. 1, p. 91-109, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/360024367_Numerical_analysis_of_storey-to-storey_fire_spreading. Acesso em: 02 jul. 2022.

SĘDŁAK, B. *et al.* Fire-stop wraps and collars with intumescent materials-performance comparison. **Procedia Engineering**, [Amsterdam], v. 172, p. 961–968, 2017.

SEITO, A. I. Fundamentos de fogo e incêndio. *In*: SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 35–54.

SHAMERI, M. A. *et al.* Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 15, n. 3, p. 1468–1475, 2011.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. São Paulo: Blucher, 2013.

SILVA, V. P. *et al.* Segurança das estruturas em situação de incêndio. *In*: SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 135–167.

SRIVASTAVA, G.; NAKRANI, D.; GHOROI, C. Performance of combustible facade systems with glass, ACP and firestops in full-scale, real fire experiments. **Fire Technology**, Boston, v. 56, n. 4, p. 1575-1598, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10694-019-00943-4>. Acesso em: 20 maio 2021.

SUN, J.; HU, L.; ZHANG, Y. A review on research of fire dynamics in high-rise buildings. **Theoretical and Applied Mechanics Letters**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 042001, 2013.

THERMAFIBER INSOLUTIONS. **Perimeter fire barrier system guide**: life safety, codes and compliance, components and systems. Toledo, OH: Thermafiber, 2018. Disponível em: <https://www.thermafiber.com/wp-content/uploads/2019/03/10022722-Fire-Containment-Brochure-Ir.pdf>. Acesso em: 25 set. 2022.

TOMA, A. **Curtain wall fire protection systems**. Dubai: [s. n.], 2012. Trabalho apresentado ao Safety Design in Buildings – Forum, 2012, Dubai. Disponível em: <http://safetydesigninbuildings.com/dubai12/presentations/Amir-Toma-Hilti.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2021.

VIDROS têm papel principal em fachadas: sistemas pra lá de modernos fazem dos prédios um embrulho transparente. **O Vidroplano**, v. 50, n. 413, p. 32-39, maio 2007. Disponível em: <https://abravidro.org.br/revistapdf/?urlpdf=17184>. Acesso em: 12 abr. 2021.

WANG, B. *et al.* Study on the mechanical property of textile reinforced self-stressing concrete sheets. **Construction and Building Materials**, Washington, DC, v. 107, p. 1–10, 2016a.

WANG, Y. *et al.* Influence of fire location on the thermal performance of glass façades. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 106, p. 438–442, 2016.

WANG, Y. *et al.* Investigation of thermal breakage and heat transfer in single, insulated and laminated glazing under fire conditions. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 125, p. 662–672, 2017.

WANG, Y. *et al.* Numerical study on fire response of glass facades in different installation forms. **Construction and Building Materials**, Washington, DC, v. 61, p. 172–180, 2014.

WANG, Y. *et al.* Sensitivity analysis of influencing factors on glass façade breakage in fire. **Fire Safety Journal**, Lausanne, v. 98, p. 38-47, Jan. 2018.

WESTPHAL, F. S. **Manual técnico do vidro plano para edificações**. São Paulo: Associação Brasileira das Indústrias de Vidro, 2020.

YEHIA, S.; KASHWANI, G. Performance of structures exposed to extreme high temperature: an overview. **Open Journal of Civil Engineering**, Soest, The Netherlands v. 03, n. 03, p. 154–161, 2013.

YILMAZ, D. G. Fire safety of tall buildings: approach in design and prevention. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF CONTEMPORARY AFFAIRS IN ARCHITECTURE AND URBANISM - ICCAUA, 5th, 2022, Alanya, Turkey. **Proceedings** [...]. Alanya, Turkey: Alanya Hamdullah Emin Paşa University. 2022. p. 206-216. Disponível em: <https://journal.iccaua.com/index.php/jiccaua/article/view/26/23>. Acesso em: 10 out. 2022.

ZEMELLA, G.; FARAGUNA, A. **Evolutionary optimisation of façade design**: a new approach for the design of building envelopes. London: Springer, 2014.

ZHOU, B. X. Application and design requirements of fire windows in buildings. **Procedia Engineering**, [Amsterdam], v. 71, p. 286-290, 2014.