

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DO
REVESTIMENTO EM ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS
CERÂMICOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

ISABELA CASSIA DOMINICAL PARRA

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Isabela Cassia Dominical Parra

**Estudo experimental do desempenho do revestimento em alvenaria estrutural
de blocos cerâmicos em situação de incêndio**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Assoc. Márcio Roberto Silva Corrêa

São Carlos

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

P258e Parra, Isabela Cassia Dominical
Estudo experimental do desempenho do revestimento em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos em situação de incêndio / Isabela Cassia Dominical Parra; orientador Marcio Roberto Silva Corrêa. São Carlos, 2024.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2024.

1. blocos cerâmicos . 2. alvenaria estrutural . 3. análise experimental . 4. incêndio . 5. comportamento térmico . 6. revestimento . I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **ISABELA CASSIA DOMINICAL PARRA**.

Título da dissertação: "Estudo experimental do desempenho do revestimento em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos em situação de incêndio".

Data da defesa: 26/03/2024.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado Marcio Roberto Silva Corrêa
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADA

Prof. Dr. Humberto Ramos Roman
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

APROVADA

Prof. Dr. Roberto Márcio da Silva
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Prof. Associado **Ricardo Carrazedo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui não foi um caminho fácil, por isso primeiramente: Obrigado, Meu Deus por poder desfrutar desse momento. Obrigado por me dar forças para conseguir defender esse Título a qual eu almejava já na Graduação. Obrigado Deus por ter me feito uma pessoa forte, para enfrentar os desafios que apareceram no caminho durante esses cinco anos.

Obrigado ao meus pais, que me proporcionaram todo conforto e apoio durante esse tempo, mesmo sem bolsa de estudos. Vocês são minha fonte de inspiração e o motivo pelo qual eu busco sempre ser melhor. Aos meus irmãos, agradeço por sempre estarem ao meu lado e torcendo por mim.

Ao Paulo, meu namorado, agradeço por me ouvir e me reerguer quando eu achava que não ia dar conta, quando não acreditava mais em mim. Aos meus colegas de Departamento, obrigado por compartilhar os primeiros anos com muita garra e persistência.

Ao meu Orientador Márcio Corrêa, agradeço por todo apoio, o direcionamento e as contribuições para a pesquisa. Obrigado por toda a paciência, por estar presente quando precisei, por todas as indagações e conhecimento compartilhado durante todo esse tempo.

Aos Professores Jorge Munaiar e Vladimir Haach, e aos demais colegas do grupo de pesquisa, agradeço a troca de conhecimento, pelas contribuições técnicas e por todo suporte ao longo desse tempo. Aos técnicos do Laboratório, agradeço por ter me auxiliado nos ensaios experimentais, e aos demais funcionários do Departamento Engenharia de Estruturas, obrigado pela contribuição seja ela direta ou indireta que fizeram eu obter o resultado esperado.

Agradeço à Escola de Engenharia de São Carlos, principalmente o Departamento de Engenharia de Estruturas, por permitir o suporte técnico e disponibilizar toda infraestrutura para que eu conseguisse realizar os ensaios experimentais.

Por fim eu agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa, FAPESP, pelo financiamento da pesquisa, a qual não seria possível a conclusão, sem tal apoio. À Cerâmica Palma de Ouro, obrigado por fornecer os blocos para que os resultados pudessem ser comparados aos de pesquisas anteriores.

RESUMO

PARRA, I. C. D. **Estudo experimental do desempenho do revestimento em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos em situação de incêndio.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo capaz de resistir aos esforços solicitantes da estrutura, sendo constituída principalmente de blocos e argamassa, podendo ser armada ou não. Apesar do vasto emprego desse sistema, não existe uma norma brasileira que especifica quais medidas devem ser tomadas para conter os efeitos causados nas estruturas pela ação térmica. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação experimental buscando encontrar revestimentos que melhorem a condição de isolamento térmico da estrutura. Pretende-se avaliar pequenas paredes e prismas de alvenaria estrutural revestidos submetidos à situação de incêndio, analisando-se suas propriedades térmicas e o desempenho do revestimento. Para realização do programa experimental foram considerados blocos cerâmicos de parede vazada de 6 MPa e diferentes revestimentos à base de cimento ou de gesso. Foram executadas as caracterizações necessárias dos materiais que compõem os corpos de prova em condições ambientes e, depois de expostos ao fogo, cuja variação seguiu a curva de incêndio-padrão normalizada pela ISO 834-1:1999. Posteriormente realizou-se uma análise visual e dos dados coletados com o ensaio, verificando-se o isolamento térmico e o desempenho dos diferentes revestimentos empregados. Ao analisar os resultados observou-se que alguns revestimentos melhoraram bastante a resistência residual das pequenas paredes, merecendo destaque o revestimento de argamassa de gesso com vermiculita e o Derwall RF. Quanto ao comportamento térmico os revestimentos de maior espessura, ou seja, aqueles com cimento na composição, foram mais eficientes em relação as argamassas de gesso.

Palavras-chave: blocos cerâmicos; alvenaria estrutural; análise experimental; incêndio; comportamento térmico; revestimento.

ABSTRACT

PARRA, I. C. D. **Experimental study of the performance of ceramic block structural masonry cladding in fire situations.** 2024. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structural Engineering)) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2024.

Structural masonry is a construction system capable of resisting the stresses and strains of the structure. It consists of blocks and mortar and can be reinforced or not. Despite the widespread use of this system, there is no Brazilian standard that specifies what measures should be taken to contain the effects caused on structures by thermal action. In this context, the aim of this work is to conduct an experimental evaluation to find coatings that improve the thermal insulation condition of the structure. The aim is to evaluate small clad structural masonry walls and prisms subjected to fire, analyzing their thermal properties and the performance of the cladding. The experimental program considered 6 MPa hollow-wall ceramic blocks and different coatings based on cement or gypsum. The necessary characterizations of the materials making up the specimens were conducted under ambient conditions and after exposure to fire, the variation of which followed the standard fire curve standardized by ISO 834-1:1999. Subsequently, a visual analysis was made of the data collected during the test, verifying the thermal insulation and performance of the different coatings used. When analyzing the results, it was observed that some coatings greatly improved the residual resistance of the small walls, with the gypsum mortar coating with vermiculite and RF Drywall standing out. In terms of thermal performance, the thicker coatings, i.e., those with cement in the composition, were more efficient than the gypsum mortar.

Keywords: clay hollow blocks; structural masonry; experimental analysis; fire; thermal behavior; coating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Forno a gás do Laboratório de Estruturas da EESC – USP.	20
Figura 2: Incêndios que marcaram a história – Foto à esquerda Edifício Andraus; Foto à direita Edifício Joelma.	23
Figura 3: Incêndio no Edifício Wilton Paes de Almeida antes da estrutura vir abaixo.	23
Figura 4: Tetraedro do Fogo.	24
Figura 5: Curva Temperatura x Tempo típica de um incêndio real.	25
Figura 6: Curva Temperatura x Tempo típica de um incêndio natural.	26
Figura 7: Curva típica do incêndio-padrão.	27
Figura 8: Mecanismos de transferência de calor	28
Figura 9: Modelo de compartimentação vertical.	38
Figura 10: Modelo de compartimentação horizontal.	39
Figura 11: Pequena parede de alvenaria estrutural sob teste de compressão antes da elevação de temperatura	40
Figura 12: Fenômeno do lascamento em paredes de alvenaria sem carregamento e carregadas	42
Figura 13: Fissuras na face exposta ao fogo, após o ensaio.	43
Figura 14: Fissura aparente no painel preenchido com graute.	44
Figura 15: Esquema do ensaio realizado por Menegon et al (2017)	45
Figura 16: Modo de ruptura das paredes compartimentadas após o ensaio	46
Figura 17: Parede após o término do ensaio, ao lado esquerdo a face exposta ao fogo e ao lado direito a face não exposta com apenas algumas fissuras.	47
Figura 18: Aplicação da chama na superfície onde foi aplicada a tinta intumescente.	54
Figura 19: Prismas revestidos após a situação de incêndio. O primeiro prisma foi revestido com pasta de gesso e os demais com argamassa de gesso.	56
Figura 20: Blocos de cerâmica, de parede vazada, com resistência de 6Mpa	59
Figura 21: Dimensões Efetivas dos blocos de alvenaria estrutural.	60
Figura 22: Ensaio para determinação das dimensões efetivas	61
Figura 23: Medida do desvio e planeza das faces dos blocos de alvenaria estrutural	62
Figura 24: Ensaio para determinação da planeza das faces	63

Figura 25: Etapas do ensaio para determinação das Áreas líquida e bruta	64
Figura 26: Secagem dos blocos em estufa, pesagem e submersão por 24 horas. ...	65
Figura 27: Ruptura dos blocos de alvenaria estrutural	68
Figura 28: Distribuição granulométrica das areias	69
Figura 29: Corpo de prova de argamassa de assentamento rompido à compressão	71
Figura 30: Ensaio se início e fim de pega da argamassa de gesso e areia	74
Figura 31: Corpos de provas confeccionados para os ensaios	75
Figura 32: Modo de Ruptura dos prismas	76
Figura 33: Modo de Ruptura das pequenas paredes	77
Figura 34: Disposição dos termopares em cada conjunto de revestimento.	79
Figura 35: Detalhamento do termopar instalado na parte superior da pequena parede revestida.	79
Figura 36: Termopares instalados ao longo da pequena parede revestida.....	80
Figura 37: Disposição dos corpos de prova dentro do forno	81
Figura 38: Disposição dos corpos de prova dentro do forno à esquerda a foto dos grupos da primeira fornada. À direita a foto dos grupos da segunda fornada.....	82
Figura 39: CONJUNTO SEM REVESTIMENTO - À esquerda a pequena parede ao ser resfriada. No meio o prisma ao sair do forno. À direita a parede depois do ensaio de resistência residual	84
Figura 40: CONJUNTO COM ARGAMASSA TRADICIONAL: À esquerda o aspecto ao ser resfriado sem a retirada do revestimento, à direita depois de retirado o revestimento para visualização das fissuras	85
Figura 41: CONJUNTO DE ARGAMASSA COM INCORPORADOR DE AR: À esquerda a pequena parede ao ser resfriada. No meio o prisma sem a aderência do revestimento. À direita com poucas fissuras após os 120min.....	86
Figura 42: CONJUNTO DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPIPILENO: À esquerda o lado que estava interno ao trio. As outras duas, a pequena parede depois de ensaiado quanto à resistência residual à compressão ...	87
Figura 43: Prisma com argamassa com adição de fibra de polipropileno após o resfriamento.	87
Figura 44: CONJUNTO COM DRAWALL RESISTENTE AO FOGO: 1° - Prisma depois de resfriado. 2° - Parede ao ser retirada do forno, depois do resfriamento. 3° - Parede depois de rompida para verificação da resistência residual	88

Figura 45: CONJUNTO COM TINTA INTUMESCENTE: À esquerda o prisma depois de rompido para verificação da resistência residual. Ao meio a parede ao ser retirada do forno, depois do resfriamento. À Direita a parede depois de rompida para verificação da resistência residual.....	89
Figura 46: CONJUNTO DE ARGAMASSA DE GESSO COM VERMICULITA: À esquerda o prisma depois de rompido para verificação da resistência residual. Ao meio a parede ao ser retirada do forno, depois do resfriamento. À Direita a parede depois de rompida para verificação da resistência residual.....	89
Figura 47: CONJUNTO DE ARGAMASSA DE GESSO E AREIA: À esquerda parede ao ser retirada do forno, depois do resfriamento. À Direita a parede depois de rompida para verificação da resistência residual	90
Figura 48: Disposição dos termopares em cada conjunto de revestimento.	94
Figura 49: Curva Tempo X Temperatura – Grupo SEM REVESTIMENTO.....	96
Figura 50: Curva Tempo X Temperatura – Grupo ARGAMASSA TRADICIONAL.....	96
Figura 51: Curva Tempo X Temperatura – Grupo COM INCORPORADOR DE AR .	97
Figura 52: Curva Tempo X Temperatura – Grupo COM FIBRA DE POLIPROPILENO	97
Figura 53: Curva Tempo X Temperatura – Grupo de TINTA INTUMESCENTE	98
Figura 54: Curva Tempo X Temperatura – Grupo de DRYWALL.....	99
Figura 55: Prisma revestido de Drywall após o resfriamento	100
Figura 56: Curva Tempo X Temperatura – Grupo de ARGAMASSA DE GESSO COM AREIA	101
Figura 57: Curva Tempo X Temperatura – Grupo de ARGAMASSA DE GESSO COM VERMICULITA	102
Figura 58: Curva Tempo X Temperatura – Comparação do termopar de todos os conjuntos da primeira e segunda fornada	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tempo de requerido de resistência ao fogo	30
Tabela 2: Espessura mínima equivalente para paredes de alvenaria de blocos cerâmicos	32
Tabela 3: Fator multiplicador da espessura dos acabamentos aplicados na face não exposta ao fogo	33
Tabela 4: Tempo de contribuição de cada material de acabamento aplicado na face exposta ao fogo	34
Tabela 5: Índice de esbeltez máximo para adequabilidade estrutural	36
Tabela 6: Espessura mínima das paredes considerando o critério de isolamento térmico	37
Tabela 7: Resumo das informações apresentadas até o momento.	48
Tabela 8: Dimensões médias efetivas das unidades cerâmicas (mm)	61
Tabela 9: Espessura dos septos e paredes externas, desvio em relação ao esquadro e planeza das faces (mm)	62
Tabela 10: Área bruta, área líquida e relação <i>AliqABruta</i>	64
Tabela 11: Massa Seca, Massa úmida e Índice de Absorção.....	66
Tabela 12: Resistência Característica à Compressão.....	67
Tabela 13: Propriedades físicas dos aglomerantes	68
Tabela 14: Propriedades físicas dos agregados.....	70
Tabela 15: Propriedades mecânicas da argamassa de assentamento	72
Tabela 16: Propriedade das argamassas de revestimento	74
Tabela 17: Dados da resistência residual do grupo de prismas	91
Tabela 18: Dados da Resistência Residual do grupo de pequenas paredes.....	91

Lista de Símbolos

t	Tempo em minutos
T_0	Temperatura inicial do ambiente em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), sendo: $10^{\circ}\text{C} \leq T_0 \leq 40^{\circ}\text{C}$
T	Temperatura do forno no instante de tempo t
t_e	Tempo requerido de resistência ao fogo
$q_{fi,k}$	Valor característico da carga de incêndio específica
γ_n	Coeficiente adimensional que considera as medidas de proteção ativas que serão instaladas da edificação
γ_s	Coeficiente relacionado ao risco de incêndio na edificação e seu possível colapso
γ_{s1}	Coeficiente relacionado à área de piso do compartimento e à altura da edificação
γ_{s2}	Coeficiente relacionado ao risco de ativação do incêndio
W	Valor associado à ventilação e à altura do ambiente
K	Fator associado às características dos materiais de vedação do compartimento
v	Grau de ventilação
A_v	Área total de aberturas verticais
h	Altura média das janelas
A_t	é a área total do ambiente incluindo aberturas
T_{ea}	Espessura desconsiderando os vazios dos blocos
T_e	Espessura equivalente do bloco
T_{ef}	Espessura equivalente do acabamento
V_n	Volume líquido do bloco
L	Comprimento do bloco
H	Altura do bloco
S_f	Índice de esbeltez da parede submetida ao incêndio
a_{vf}	Fator
H_t	Altura entre seus travamentos verticais da parede
t_t	Espessura total da parede perpendicular ao seu eixo principal
a_k	Fator

L_p	Comprimento da parede
A_{liq}	Área líquida da unidade
M_u	Massa do bloco saturado
M_a	Massa aparente do bloco
γ	Massa específica da água
h_b	Altura do bloco
AA:	Índice de absorção de água
M_s	Massa seca do corpo de prova

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	METODOLOGIA	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	22
2.1.1	O incêndio.....	24
2.1.1.1	<i>Curva de incêndio real</i>	25
2.1.1.2	<i>Curva de incêndio natural</i>	26
2.1.1.3	<i>Curva de incêndio padrão</i>	27
2.1.2	Transferência de calor.....	28
2.1.3	Tempo requerido de resistência ao fogo	29
2.1.4	Espessura mínima equivalente	31
2.1.5	Compartimentação dos elementos estruturais	37
2.2	ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	39
2.3	REVESTIMENTO EM ALVENARIA ESTRUTURAL	49
2.3.1	Fibras de polipropileno	51
2.3.2	Incorporador de ar	52
2.3.3	Pintura especial	53
2.3.4	Gesso.....	54
2.3.5	Vermiculita	56
3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS, COMPONENTES E ELEMENTOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL.....	58
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES DE ALVENARIA.....	58
3.1.1	Propriedades geométricas	60

3.1.2 Propriedades físicas	64
3.1.3 Propriedades mecânicas	66
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO E DE REVESTIMENTO	68
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL	75
4 ORGANIZAÇÃO DO ENSAIO	78
4.1 INSTRUMENTAÇÃO	78
4.2 SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO-PADRÃO	80
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	83
5.1 DESEMPENHO MECÂNICO DOS ELEMENTOS	83
5.2 DESEMPENHO TÉRMICO DOS ELEMENTOS	93
6 CONCLUSÕES	105
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

Comparado aos sistemas construtivos tradicionais, a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos é uma das mais econômicas, Soares (2011). Por esse motivo e por outras vantagens como: maior racionalização da obra, economia de fôrmas, técnicas de execução simplificada, entre outras, esse sistema vem ganhando espaço no mercado e com isso surgiu a necessidade de se estudar o comportamento dos seus elementos.

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), as construções utilizando blocos de diversos materiais surgiram juntamente com o conhecimento humano em executar estruturas, podendo-se citar como exemplos de obras realizadas em blocos as Pirâmides de Gizé, o Farol de Alexandria e o Coliseu. Um marco importante nas construções modernas de alvenaria estrutural foi o edifício Monadnock, construído entre os anos de 1889 e 1891 em Chicago, com 65 metros de altura e 16 pavimentos, sendo um desafio para a época. Já no Brasil, excetuando-se as antigas construções com influência colonial europeia, a alvenaria estrutural é recente, acreditando-se que os primeiros edifícios tenham surgido no ano de 1966, na cidade de São Paulo, com somente quatro pavimentos.

Apesar das primeiras construções brasileiras em alvenaria estrutural serem da década de 60, somente na década de 80 é que as normas nacionais sobre o tema entraram em vigor, época em que houve um interesse maior por parte dos pesquisadores voltado para o aperfeiçoamento das técnicas construtivas, das características dos materiais e dos parâmetros de projeto. Uma vez que esses textos tenham sido baseados em normas internacionais já consolidadas, é preciso que haja uma validação local, uma vez que existe uma grande variedade de materiais no mundo.

Com o passar dos anos e o avanço das tecnologias, vão surgindo novas técnicas, novos materiais e até mesmo novas preocupações perante o comportamento apresentado nas diversas situações que o material se encontra ou é exposto, tornando necessária a constante atualização das normas regulamentadoras. Diante disso, uma das preocupações atuais é o desempenho da alvenaria estrutural quando submetida a elevadas temperaturas. Em razão da normatização brasileira não especificar diretamente o que se deve fazer nesses casos, o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo através da Instrução Técnica IT-08:2019 - Segurança estrutural

contra incêndio recomenda que se consulte a Eurocode 06: 2005 - *Design of masonry structures, Part 1-2: General rules: Structural fire design*, ou normas internacionais similares. Entretanto, devido à diversidade de materiais encontrados nas diferentes regiões, o comportamento pode não ser o indicado pelos códigos internacionais.

Visando contribuir juntamente com as demais pesquisas que já vêm sendo realizadas sobre o assunto, pretende-se analisar como os revestimentos à base de cimento ou de gesso se comportam frente a uma simulação de incêndio em pequenas paredes e prismas, para posteriormente colaborar com as atualizações normativas da alvenaria estrutural.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho do revestimento em pequenas paredes e prismas estruturais de bloco cerâmico, sem que haja aplicação de carregamento, quando submetido à situação de incêndio, disponibilizando informações que contribuam com a normatização brasileira.

Para conclusão desse objetivo principal, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- Ensaiar conjuntos de três pequenas paredes com blocos cerâmicos revestidas nas duas faces, unidas pelos cantos formando em planta um triângulo equilátero, sendo cada conjunto isolado termicamente por manta cerâmica, com a intenção de simular um ambiente compartimentado, sendo este aquecido somente nas faces externas para que posteriormente possa fazer comparação entre os conjuntos;
- Ensaiar prismas com diferentes tipos de revestimentos nas duas faces, dispostos de maneira individual dentro do forno para auxiliar na comparação dos resultados do desempenho dos diferentes revestimentos;
- Simular um incêndio-padrão em um forno a gás, aplicando fogo nas duas faces maiores dos prismas revestidos e na face externa dos conjuntos de trios formado por paredes isoladas, para obter o comportamento térmico os elementos;
- Fazer uma inspeção visual das características das pequenas paredes e dos prismas revestidos, após serem ensaiados a elevadas temperaturas para contribuir na análise dos dados obtidos a partir dos termopares e do ensaio à resistência residual à compressão dos elementos;

- Avaliar a resistência residual de compressão das pequenas paredes e dos prismas após a simulação de incêndio-padrão e comparar com a resistência à temperatura ambiente, aplicando carregamento de forma gradual;
- Comparar a resistência residual entre as pequenas paredes com os diferentes tipos de revestimento;
- Comparar a resistência residual entre os prismas com os diferentes tipos de revestimento;

1.2 JUSTIFICATIVA

Como já mencionado, vêm crescendo os números de edifícios em alvenaria estrutural, causando preocupações quando esses são submetidos a um incêndio, principalmente quando se avalia o critério de segurança estrutural. Diante disso, algumas instituições do país estão realizando pesquisas com o propósito de investigar o comportamento dos elementos de alvenaria estrutural em contato com elevadas temperaturas por meio de análises experimentais, teóricas e numéricas, levando em consideração as variáveis deste sistema construtivo pelo Brasil.

Algumas pesquisas apontam que alvenarias com revestimento tendem a resistir mais quando entram em contato com o fogo. Segundo Rosemann (2011), o tempo de resistência ao fogo aumenta 85% quando as paredes de blocos cerâmicos são revestidas nas duas faces, e 100% quando elas são revestidas e adicionalmente possuem os furos preenchidos com areia. Já de acordo com Rodovalho (2018), que realizou uma análise numérica de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais, os prismas do grau corta-fogo CF60, quando revestidos, elevam a resistência ao grau CF120, grau máximo exigido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 14432:2001 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Com base nessas afirmações, esta pesquisa visa contribuir com avaliações do desempenho de alguns tipos de revestimentos aplicados em alvenaria de blocos cerâmicos mediante ensaios experimentais com a elevação da temperatura, buscando o aumento do tempo de resistência ao fogo, e a análise de dois critérios apresentados no Eurocode 06 Part 1-2:2005, que são: o de isolamento e o de resistência, no caso residual.

A comissão da ABNT, órgão responsável pelo regimento das normas brasileiras, pretende adicionar um tópico sobre estruturas sujeitas a elevadas

temperaturas na norma de alvenaria, devido ao aumento do número de incêndios em estruturas nos últimos anos, o que eleva ainda mais a oportunidade dessa pesquisa.

1.3 METODOLOGIA

Inicialmente, foi feita uma revisão bibliográfica sobre a alvenaria estrutural tanto de bloco cerâmico (foco principal do projeto), como de bloco de concreto, buscando informações dos materiais mais utilizados em edificações atualmente, como o comportamento deles em situação de incêndio. Por meio dos principais trabalhos disponíveis na literatura, incluindo normas nacionais e internacionais, atentando-se para características do material, para os ensaios de caracterização dos elementos necessários e os principais tipos de revestimento utilizados em edifícios. Prosseguindo com o estudo do comportamento das estruturas em geral sujeitas ao incêndio, como esse fenômeno ocorre, quais os meios de propagação, quais cuidados com a compartimentação devem ser tomados segundo o Corpo de Bombeiros, qual o tempo de resistência ao fogo, quais critérios devem ser mantidos para preservar a segurança estrutural, chegando-se nas pesquisas específicas sobre alvenaria estrutural que tratam de pontos ligados diretamente ao presente estudo.

Como o assunto principal engloba os revestimentos, explorou-se em artigos internacionais o que é utilizado para resistir a altas temperaturas, admitindo-se como base as diretrizes do Eurocode 06 Part 1-2:2005, British Standard BS 5628: *Code of practice for the use of masonry – Part 1: Structural use of unreinforced masonry*, 2005 e Australian Standard AS 3700 - *Masonry structures*, 2011. Verificou-se, então, os revestimentos estudados em pesquisas nacionais em alvenaria e em outros sistemas construtivos, buscando técnicas e elementos que poderiam contribuir com a presente investigação.

Posteriormente foi realizada a caracterização geométrica, física e mecânica dos corpos de prova de alvenaria submetidos à temperatura ambiente, sendo ensaiados todos os tipos de blocos e meio-blocos utilizados na pesquisa, e foram realizados ensaios para caracterização da argamassa de assentamento dos blocos e dos materiais que compõem os revestimentos.

Na sequência, foram feitos dois ensaios em temperaturas elevadas dos corpos de prova, sem aplicação de carregamento e com o resfriamento rápido ao término do ensaio, sendo que, depois de resfriados, foi feita a análise visual do desempenho dos

revestimentos e da alvenaria em si. Nesta etapa ensaiaram-se prismas e pequenas paredes com diferentes revestimentos à base de cimento ou de gesso. As pequenas paredes foram organizadas em trios, sendo unidas pelas laterais formando em planta um triângulo equilátero, com o interior isolado termicamente, com o auxílio de manta cerâmica, para simular a compartimentação de um ambiente, sendo, assim, o aquecimento considerado somente nas faces externas.

Os ensaios de simulação de incêndio foram executados no forno a gás, mostrado na Figura 1, que se encontra no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC – USP).

Figura 1: Forno a gás do Laboratório de Estruturas da EESC – USP.



Fonte: Arquivo pessoal do Professor Associado Márcio Roberto Silva Corrêa (2018).

Em seu interior existe um controle de gás que atende à curva de incêndio-padrão da ISO 834-1:1999 – *Fire resistance tests - elements of building construction: Part 1. General requirements*, que será descrita nos próximos capítulos, relacionando a temperatura dos gases com o tempo de ocorrência do incêndio.

Após a obtenção de todos os resultados adquiridos durante a pesquisa, realizou-se uma análise criteriosa dos dados e dos corpos de prova, buscando obter

parâmetros, técnicas e relações que possam auxiliar normas e diretrizes relacionadas ao tema.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, sendo que no capítulo 1 encontra-se a introdução ao tema, o objetivo principal, os objetivos específicos, as justificativas e a metodologia utilizada durante o processo de desenvolvimento da pesquisa.

No capítulo 2 desenvolve-se a revisão bibliográfica, onde são discutidos conceitos referentes ao comportamento das estruturas em situação de incêndio; depois o foco passa a ser somente as estruturas em alvenaria estrutural, além de informações e referências sobre os revestimentos a serem ensaiados.

No capítulo 3 é apresentado como se deu a escolha dos revestimentos e quais ensaios foram realizados nos blocos em temperatura ambiente, nas argamassas de assentamento e de revestimentos e os ensaios que seriam realizados no forno: quantidades de elementos a serem ensaiados, a instrumentação dos elementos submetidos à elevação de temperatura mediante ensaio de incêndio-padrão, e os revestimentos escolhidos.

No capítulo 4 apresentam-se todos os resultados obtidos com a caracterização geométrica, física e mecânica dos blocos, prismas e pequenas paredes e a caracterização da argamassa de assentamento e dos revestimentos escolhidos, assim como a análise dos resultados.

No capítulo 5, encontra-se os resultados dos ensaios em situação de incêndio, e das resistências residuais obtidas no ensaio de compressão após os corpos de prova serem submetidos a elevadas temperaturas.

Por fim nos capítulos 6 e 7, apresentam-se as conclusões obtidas com os estudos e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado informações presentes na literatura que auxiliaram ao longo de todo o estudo. Como o tema principal é alvenaria de bloco cerâmico em situação de incêndio, primeiramente optou-se por falar sobre as estruturas em situação de incêndio, como o incêndio é formado, entre outros assuntos bastante relevante para a pesquisa como os modelos de incêndio, o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), compartimentação e os principais critérios de resistência.

Depois será descrito os principais estudos realizados no Brasil e no mundo, enfatizando o comportamento da alvenaria sob altas temperaturas e o efeito que os revestimentos proporcionam a proteção da estrutura, especificamente aqueles que foram utilizados na análise experimental dessa pesquisa.

2.1 ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O desenvolvimento de normas e as preocupações frente aos incêndios se intensificaram a partir de alguns grandes acontecimentos que marcaram a história brasileira. Os incêndios no edifício Andraus e no edifício Joelma, Figura 2 a seguir, foram os primeiros a acenderem o alerta para a necessidade de estudos sobre o assunto, devido aos prejuízos materiais e humanos por eles causados.

Existem outros episódios, em que mesmo não havendo muitas vítimas, a estrutura foi bastante prejudicada, levando a grandes prejuízos, como por exemplo o incêndio do edifício Wilton Paes de Almeida, que é apresentado na Figura 3, do Museu da Língua Portuguesa e do Museu Nacional do Rio de Janeiro. Surgiram, então, indagações e dúvidas sobre os materiais e sistemas construtivos em situação de incêndio, ou seja, como as estruturas se comportariam em contato com as altas temperaturas. Perante esse cenário, foram aparecendo pesquisas sobre o assunto e comissões foram formadas para que as normas da ABNT pudessem prover tópicos específicos sobre o assunto.

Figura 2: Incêndios que marcaram a história – Foto à esquerda Edifício Andraus;
Foto à direita Edifício Joelma.



Fonte: Foto à esquerda: Zago (2018) - Foto à direita: Jornal Jovem Pan (2015)

Figura 3: Incêndio no Edifício Wilton Paes de Almeida antes da estrutura vir abaixo.



Fonte: Redação Veja São Paulo (2020)

Dentre as referidas normas pode-se citar a ABNT NBR 14432:2001, que apresenta definições importantes sobre o assunto, a tabela de classificação das

edificações e o tempo requerido de resistência ao fogo, sendo que este último será melhor detalhado abaixo.

2.1.1 O incêndio

De acordo com a Instrução Técnica da Polícia Militar do Corpo de Bombeiros nº 02:2019 - Conceitos básicos de segurança contra incêndio, incêndio é o fogo descontrolado de maneira intensa que causa danos, seja ao ambiente, à vida ou ao patrimônio. Para que ocorra o fogo de forma desordenada é necessário um conjunto de quatro componentes, juntos eles formam o que é conhecido como tetraedro do fogo, apresentado na Figura 4:

Figura 4: Tetraedro do Fogo.



Fonte: IT 02:2019

Os quatro elementos são: o combustível, que é a substância responsável por sustentar a combustão, podendo ser sólido, líquido ou gasoso; o oxigênio, que é o comburente que provoca a reação química; o calor, que corresponde à energia do sistema e eleva a temperatura; pôr fim a reação em cadeia dos outros três elementos.

Nunes (2005) diz que, independentemente de o incêndio ocorrer por uma fonte de energia térmica, mecânica ou elétrica, suas consequências, na maioria das vezes, são graves e causadas pelo calor, pela fumaça ou pelos gases. O autor também menciona que a compartimentação do ambiente, a carga de incêndio, a ventilação local, a velocidade de combustão e as características geométricas do local e dos

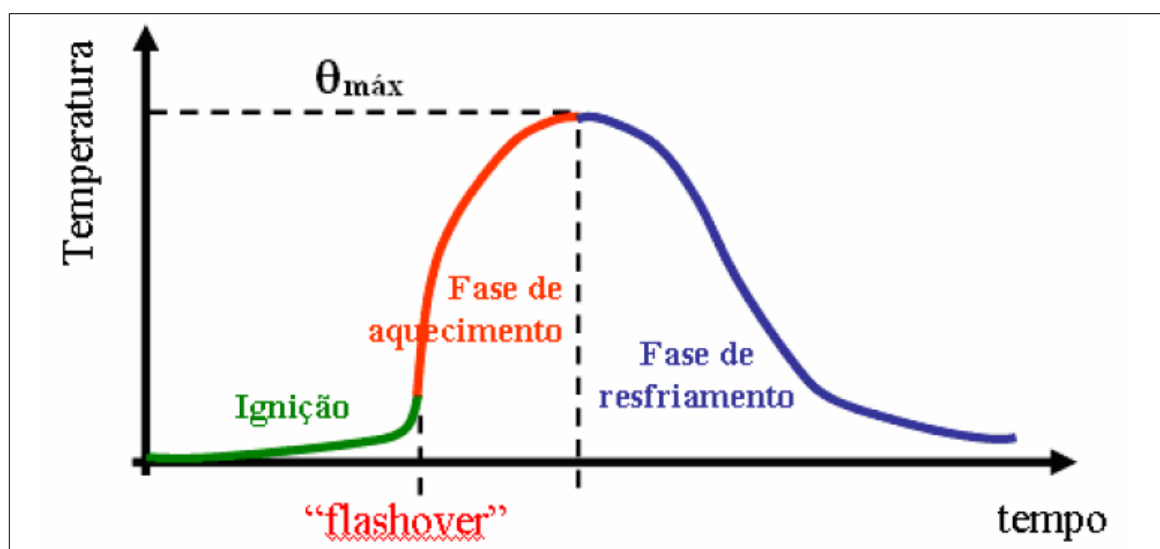
materiais que constituem a estrutura são os fatores que mais influenciam na ocorrência de um incêndio.

Como acabou de se dizer, são muitos os fatores que podem induzir a um incêndio e os parâmetros que o descrevem, porém todos eles seguem uma curva característica, que é conhecida em vários estudos por curva de incêndio real. Somente ela não é suficiente, pois essa curva é obtida por meio de inúmeras características que podem variar de um incêndio para outro, com isso teve-se dificuldades em se obterem comparações entre os estudos, percebendo-se, então, a necessidade de simplificações e representações da curva de incêndio real, passando a adotar a curva de incêndio natural e a de incêndio-padrão, que serão detalhadas a seguir:

2.1.1.1 Curva de incêndio real

A curva de incêndio real é a mais complexa, sendo dividida em três fases, de acordo com Moreno Junior e Molina (2012), cada fase possui diferentes durações e inúmeras variações. Conforme Kimura (2009), ela está associada a vários parâmetros como: a ventilação do ambiente, o *layout* das aberturas, a quantidade de cargas disponíveis para queima, variando bastante, a depender da edificação. Na Figura 5 a seguir é apresentada a curva de incêndio real:

Figura 5: Curva Temperatura x Tempo típica de um incêndio real.



Fonte: Regobello (2007)

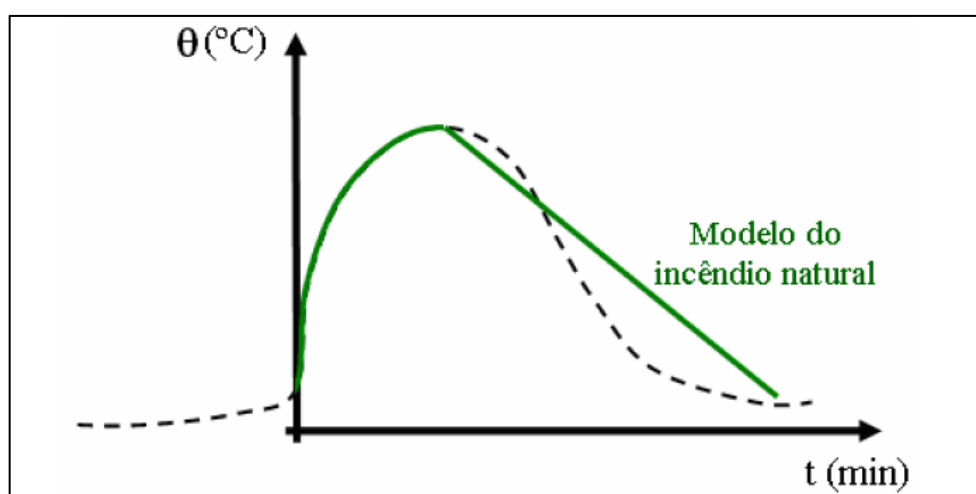
Conforme mostrado na Figura 5 as fases são:

- **Ignição ou pré-*flashover*:** nessa fase as temperaturas sobem de maneira lenta, não influenciando no comportamento estrutural, o fogo permanece localizado, podendo ser contido na maioria das vezes com as medidas de proteção contra incêndio. Regobello (2007) afirma que essa é a fase mais crítica em se tratando da vida humana, já que produz muita fumaça e gases tóxicos.
- **Aquecimento:** nessa fase a temperatura sobe drasticamente, fazendo com que o compartimento fique todo comprometido. O fogo passa a se espalhar por radiação ou contato direto até que chega à temperatura máxima.
- **Resfriamento:** essa fase é a que ocorre depois de o incêndio atingir a temperatura máxima e todo o material já ter sido queimado. A temperatura vai diminuindo gradualmente, seja por não haver mais material para ser queimado ou por ter havido intervenção do Corpo de Bombeiros.

2.1.1.2 Curva de incêndio natural

A curva de incêndio natural é simplificada a partir da curva de incêndio real. Ela possui somente as fases pós-*flashover*, sendo que a omissão da fase de ignição se deve ao fato de que ela não influi no comportamento estrutural da edificação, como já mencionado anteriormente. Outra mudança é na fase de resfriamento, em que a curva é simulada por um segmento de reta, como ilustrado na Figura 6:

Figura 6: Curva Temperatura x Tempo típica de um incêndio natural.

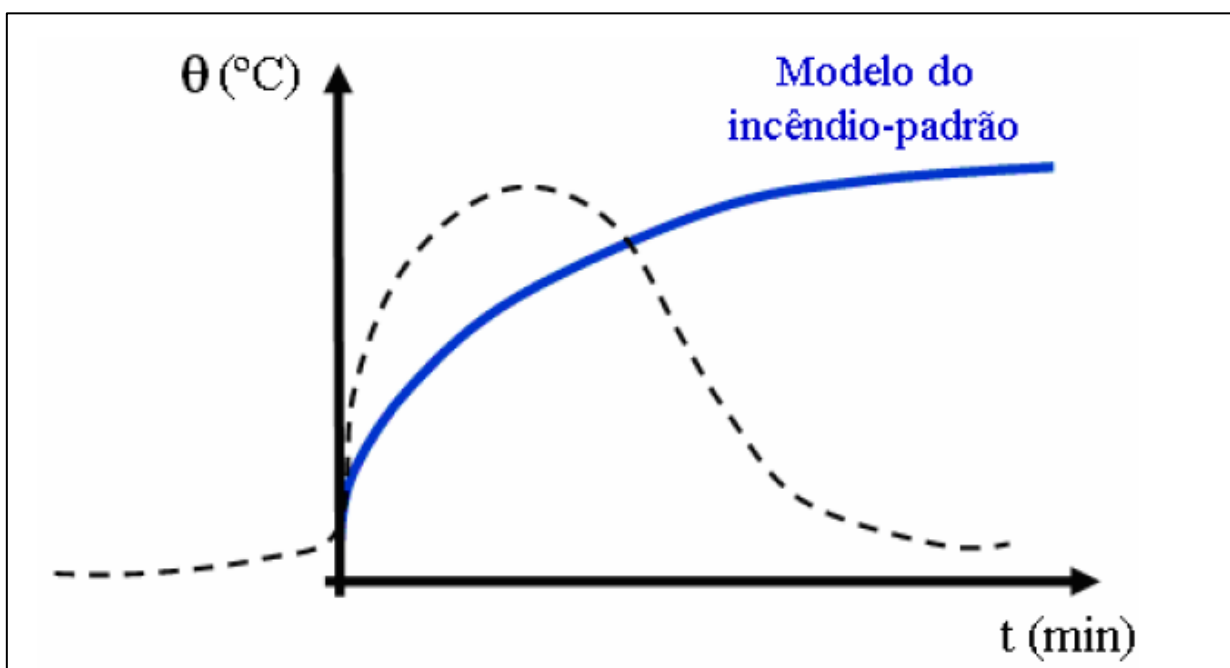


Fonte: Regobello (2007)

2.1.1.3 Curva de incêndio padrão

Com o passar dos anos percebeu-se uma necessidade de padronização das curvas, conforme Moreno Junior e Molina (2012), pois os muitos testes feitos por diferentes pesquisadores em diferentes laboratórios só poderiam ser comparados caso fossem realizados de maneira idêntica. Então, no século XX criou-se a curva que ficou conhecida como curva de incêndio-padrão, havendo uma conscientização por meio dos códigos normativos para a sua adoção, auxiliando assim os estudos experimentais e numéricos. A ABNT NBR 5628:2022 - Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo, propõe a utilização da curva de incêndio-padrão apresentada pela ISO 834-1:1999, mostrada na Figura 7:

Figura 7: Curva típica do incêndio-padrão.



Fonte: Regobello (2007)

Como pode ser visto, esta curva apresenta somente o ramo ascendente, ou seja, a temperatura não depende das características da edificação e nem das propriedades dos materiais, e sim das temperaturas dos gases do ambiente. Essa curva pode ser definida de forma analítica pela Equação 1 a seguir, podendo ser encontrada na ABNT NBR 5628:2022:

$$T - T_0 = 345 * \log(8 * t + 1) \quad (1)$$

Onde:

t : é o tempo em minutos (min);

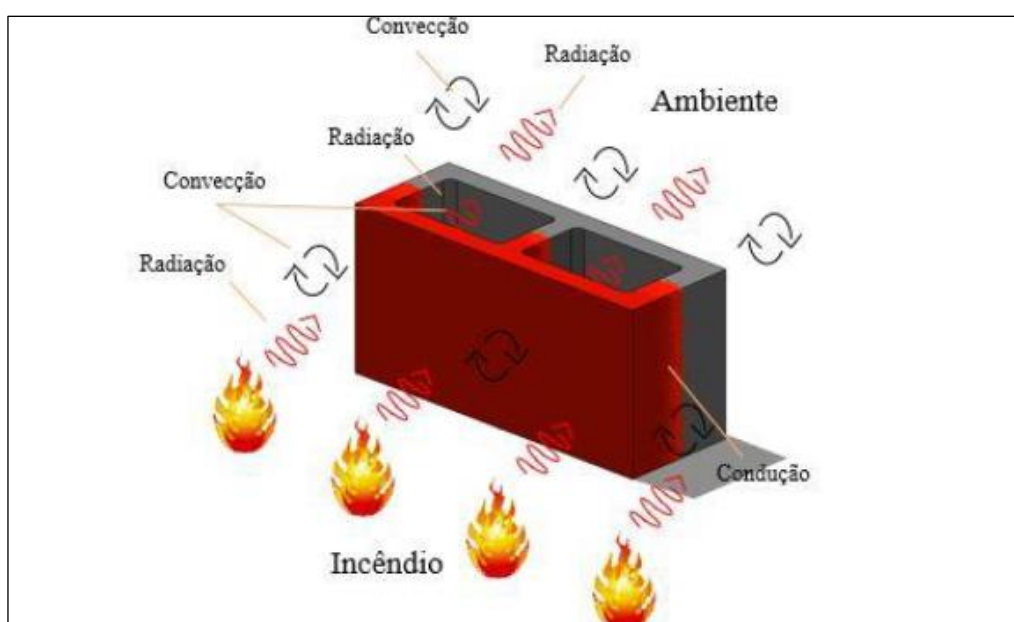
T_0 : é a temperatura inicial do ambiente em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), sendo: $10^{\circ}\text{C} \leq T_0 \leq 40^{\circ}\text{C}$;

T : é a temperatura do forno em graus Celsius no instante de tempo t .

2.1.2 Transferência de calor

Para ocorrer a transferência de calor é necessário que haja diferença de temperatura em um sistema e, assim, o calor irá fluir da região de maior temperatura para a de menor temperatura. Ela pode ocorrer de três maneiras distintas: condução, convecção ou radiação, geralmente no incêndio elas acontecem ao mesmo tempo, podendo ter a predominância de uma ou mais de uma delas. Na Figura 8 a seguir estão representados os três mecanismos de transferência de calor que se verificam no bloco de alvenaria em caso de incêndio.

Figura 8: Mecanismos de transferência de calor



Fonte: Rodvalho (2018)

A condução, representada na cor vermelha na figura acima, ocorre em corpos sólidos, conforme Buchanam e Abu (2017) em virtude de interações com elétrons livres em materiais bons condutores ou por meio de vibrações mecânicas da estrutura molecular em materiais maus condutores de calor.

Na convecção, a transferência de calor é verificada entre superfícies com estados físicos diferentes, ocorrendo com a movimentação dos fluidos, sejam eles gases ou líquidos, sendo importante na expansão das chamas e no fluxo ascendente de fumaça e gases quentes para o teto ou para fora da edificação por meio das aberturas. (KIMURA, 2009).

A última delas, a radiação não depende do meio para se propagar; ela acontece através de vibrações das ondas eletromagnéticas. Nunes (2015) diz que, em um incêndio, a radiação é responsável por transmitir cerca de 30% da energia das chamas.

2.1.3 Tempo requerido de resistência ao fogo

Toda edificação deve ser dimensionada para resistir ao fogo por um período mínimo, pressupondo as proporções que um incêndio poderia levar, independentemente do material do sistema construtivo. Esse período é conhecido como tempo requerido de resistência ao fogo, que de acordo com a IT 08:2019 é o tempo mínimo que um elemento deve resistir aos critérios de resistência, estanqueidade e isolamento quando for sujeito ao incêndio-padrão. Esse parâmetro apesar de ser dado em tempo, é um indicador utilizado em projetos estruturais, e deve garantir que os responsáveis consigam realizar todos os trabalhos necessários e as pessoas presentes na edificação consigam sair com total segurança antes que a estrutura sofra colapso, ou seja, é o tempo em que a construção deverá suportar aos esforços decorrentes das deformações térmicas e a perda de resistências devida as altas temperaturas por tempo considerável. Na Tabela 1 abaixo, é indicado um resumo dos dados apresentados no Anexo B da IT-08:2019.

Tabela 1: Tempo de requerido de resistência ao fogo

Grupo	Ocupação/Usos	Altura da Edificação (h) – em metros				
		Classe P ₁ h ≤ 6	Classe P ₂ 6 < h ≤ 12	Classe P ₃ 12 < h ≤ 23	Classe P ₄ 23 < h ≤ 30	Classe P ₅ 30 < h ≤ 80
A	Residencial	30	30	60	90	120
B	Serviços de Hospedagem	30	60	60	90	120
C	Comercial Varejista	60	60	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	30	60	60	90	120
E	Educacional e cultura física	30	30	60	90	120
H	Serviços de saúde e institucionais	30	60	60	90	120

Fonte: Adaptado da IT 08:2019

De forma analítica, o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), segundo o Eurocode 1:2002 - *Actions on structures, Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings*, pode ser calculado, conforme a Equação 2:

$$t_e = q_{fi,k} * \gamma_n * \gamma_s * W * K * M \quad (2)$$

Em que:

t_e : é o tempo requerido de resistência ao fogo, dado em minutos;

$q_{fi,k}$: é o valor característico da carga de incêndio específica, dado em MJ/m²;

γ_n : é um coeficiente adimensional que considera as medidas de proteção ativas que serão instaladas da edificação;

γ_s : é um coeficiente relacionado ao risco de incêndio na edificação e seu possível colapso, também adimensional, podendo ser calculado pela Equação 3 abaixo:

$$\gamma_s = \gamma_{s1} * \gamma_{s2} \quad (3)$$

γ_{s1} : é um coeficiente relacionado à área de piso do compartimento e à altura da edificação;

γ_{s2} : é um coeficiente relacionado ao risco de ativação do incêndio.

W : é um valor associado à ventilação e à altura do ambiente;

K : é um fator associado às características dos materiais de vedação do compartimento, é dado em min*m²/MJ;

M : é um termo que está ligado ao material da estrutura onde:

$M = 1$ - Para aço com revestimento corta fogo ou concreto

$M = 13,7 * v$ - Para aço sem revestimento;

v : é o grau de ventilação, que pode calculado pela Equação 4 a seguir:

$$v = \frac{A_v * \sqrt{h}}{A_t} \quad (4)$$

A_v : é a área total de aberturas verticais, dada em m²;

h : é a altura média das janelas, dada em metro;

A_t : é a área total do ambiente incluindo aberturas, dada em m².

2.1.4 Espessura mínima equivalente

O ACI/TMS 216.1-14 (2014), apresenta algumas tabelas em que é possível fazer relações entre o tempo requerido de resistência ao fogo com a espessura equivalente mínima da parede e determinados revestimentos. Para duas horas de exposição ao fogo a espessura equivalente da parede deveria ser no mínimo 9,7 cm para blocos maciços. Na tabela 2, adaptada da norma Americana ACI 216.1, encontram-se outras espessuras mínimas, em cm, conforme o tempo de exposição ao fogo:

Tabela 2: Espessura mínima equivalente para paredes de alvenaria de blocos cerâmicos

Tipo de material	Mínima espessura equivalente (cm) em função do tempo requerido de resistência ao fogo * **			
	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas
	Tijolo maciço de cerâmica ou xisto	6,86	9,65	12,45
Bloco vazado ou telha de barro ou xisto, sem preenchimento	5,84	8,64	10,92	12,70
Bloco vazado ou telha de barro ou xisto, grauteado ou preenchido com materiais específicos	7,62	11,18	13,97	16,76

* Tempo de resistências ao fogo não apresentados na tabela devem ser determinados por meio da interpolação linear
 ** Blocos com combinações de agregados não apresentados devem ser calculados por meio da equação 5

Fonte: Traduzido e Adaptado ACI 216.1 – 14, convertida em mm

Os valores apresentados na tabela acima baseiam-se no tipo de bloco e no tempo requerido de resistência ao fogo, levando em consideração o tipo de acabamento e configuração dos vazios do bloco, eles são calculados com base na equação 5:

$$T_{ea} = T_e + T_{ef} \quad (5)$$

Em que:

T_{ea} : espessura desconsiderando os vazios dos blocos

T_e : espessura equivalente do bloco

T_{ef} : espessura equivalente do acabamento

A espessura equivalente do bloco (T_e), quando esse não é grauteado, ou foi parcialmente grauteado deve ser calculado pela equação 6 abaixo. Caso seja grauteado ou os vazios preenchidos de outro material, ela é a própria espessura do bloco.

$$T_e = \frac{V_n}{L * H} \quad (6)$$

V_n : volume líquido do bloco

L : comprimento do bloco

H : altura do bloco

Para encontrar a espessura equivalente do revestimento é necessário saber o tipo do material e a sua espessura, e se o acabamento será aplicado na face exposta ou não ao fogo. Caso o acabamento não seja aplicado na espessura exposta ao fogo, o ACI/TMS 216.1-14 (2014), recomenda que seja aplicado um fator para ajustar a espessura equivalente T_{ef} , como apresentado na Tabela 3, em que são mostrados somente os dados relevantes para essa pesquisa.

Tabela 3: Fator multiplicador da espessura dos acabamentos aplicados na face não exposta ao fogo

Material da parede	Tipo de acabamento aplicado à parede			
	Reboco de cimento Portland e areia* ou ladrilho hidráulico	Reboco de gesso e areia	Reboco de gesso com vermiculita ou perlita	Drywall (Gesso acartonado)
Alvenaria cerâmica: tijolo maciço de argila ou xisto	1	1,25	1,75	3,0
Alvenaria de barro: bloco vazado ou telha de argila ou xisto	0,75	1	1,5	2,25

* Para argamassa de cimento Portland e areia com espessura de 1,6 cm ou inferior, aplicada diretamente na parede em seu lado não exposto ao fogo, seu fator de ajuste deverá ser 1,0

Fonte: Traduzido e Adaptado ACI 216.1 - 14

Quando o acabamento for aplicado na face exposta ao fogo o código americano recomenda considerar um incremento de tempo ao calcular o tempo requerido de resistência ao fogo conforme a Tabela 4, de acordo com o tipo de acabamento de maneira isolada.

Tabela 4: Tempo de contribuição de cada material de acabamento aplicado na face exposta ao fogo

Acabamento	Tempo (min)
Drywall (gesso acartonado)	
9,5 mm	10
12,7 mm	15
15,9 mm	20
Duas camadas de 9,5 mm	25
Uma camada de 9,5 e uma camada de 12,7 mm	35
Duas camadas de 12,7 mm	40
Drywall tipo "X" (resistente ao fogo)	
12,7 mm	25
15,9 mm	40
Argamassa de cimento Portland e areia aplicada diretamente sobre a alvenaria*	
Argamassa de cimento Portland e areia sobre tela de metal	
19 mm	20
22,2 mm	25
25,4 mm	30
Argamassa gesso e areia sobre ripas de gesso de 9,5 mm	
12,7 mm	35
15,9 mm	40
19 mm	50
Argamassa de gesso e areia sobre tela de metal	
19 mm	50
22,2 mm	60
25,4 mm	80

* para determinação da contribuição da argamassa de cimento Portland e areia, a espessura equivalente da alvenaria para uso na Tabela 2, será permitido utilizar a espessura real da argamassa ou 15,9 mm, o menor entre os dois.

Fonte: Adaptada de Dupim (2019) – Traduzida do ACI/TMS 216.1-14 (2014)

Se o fogo atuar nas duas faces da parede e com revestimentos diferentes, se faz necessário a avaliação do tempo para cada um dos lados, adotando-se o menor valor encontrado. Já se os revestimentos forem iguais, contribuindo para o aumento da resistência ao fogo, esse acréscimo de tempo a qual deverá ser considerado devido a segunda face revestida fica limitada à metade do valor considerado para a parede quando essa não fosse revestida.

Outra norma bastante interessante é a AS 3700 (2011), da Austrália. Ela é a única que considera adequabilidade estrutural, integridade/estanqueidade e isolamento térmico explicitamente. Essa norma apresenta duas opções de recomendações para os projetistas de paredes de alvenaria sujeitas a incêndios, sendo uma por meio de tabelas e outra por meio de ábacos fornecidos pelos ensaios de laboratórios. A segunda forma não ajuda diretamente os projetistas brasileiros, uma vez que os fabricantes não costumam fornecer os ábacos de dimensionamento. Utilizando as tabelas para projetar a estrutura com os critérios de adequabilidade estrutural, integridade e isolamento térmico, são considerados os limites de espessura e esbeltez da parede e cobrimento de armadura, levando em consideração todos os tipos de blocos, dos mais eficientes até aqueles com má adequabilidade estrutural e baixo isolamento térmico. Na tabela 5 são apresentados os limites de índice de esbeltez da parede para o dimensionamento, pelo método de adequabilidade estrutural, de acordo com o tipo de alvenaria (armada ou não armada) e do tipo de material empregado na fabricação dos blocos. Esse cálculo varia em função do tipo de vinculação, sendo resumido pelas equações 7, 8 e 9. A Equação 7 é utilizada quando as paredes não possuem apoio nas laterais. Quando as paredes possuem vinculação em uma ou nas duas laterais têm seu índice de esbeltez fornecido pelo menor valor calculado entre as três equações.

$$S_f = \frac{a_{vf} * H_t}{t_t} \quad (7)$$

$$S_f = \frac{0,7}{t} \sqrt{a_{vf} * H_t * a_k * L_p} \quad (8)$$

$$S_f = a_k \frac{L_p}{t_t} \quad (9)$$

Em que:

S_f : índice de esbeltez da parede submetida ao incêndio;

a_{vf} : fator

- 0,75 - Se o elemento possuir apoio em toda sua extensão lateral;
- 2,0 - Caso não haja esta restrição;

H_t : altura entre seus travamentos verticais da parede;

t_t : espessura total da parede perpendicular ao seu eixo principal;

a_k : fator

- 1,0 se a parede possuir apoio superior e inferior;
- 2,5 caso a parede possua apenas apoio inferior;

L_p : comprimento da parede

- Pode ser entre as faces laterais restringidas da parede;
- Que possua travamento lateral somente em uma das faces;
- Ou se houver aberturas ou juntas de prumo na parede, o comprimento é medido até esta abertura ou junta.

Tabela 5: Índice de esbeltez máximo para adequabilidade estrutural

Tipo de unidade da alvenaria	Tempo de resistência ao fogo (min)						
	30	60	90	120	180	240	
Blocos cerâmicos	25	22,5	21	20	18	17	
Alvenaria não armada	menos de 45% de todos os agregados						
	Blocos de silicato de cálcio com agregado basáltico	20,5	19	18	17,5	16,5	15,5
	pelo menos de 45% de todos os agregados						
	Blocos de concreto com agregado basálticos	25	22,5	21	20	18	17
Alvenaria armada	menos de 45% de todos os agregados						
	Blocos de concreto com agregado basálticos	19,5	18	17	16	15,5	15
Alvenaria armada	pelo menos de 45% de todos os agregados						
	Blocos de concreto com agregado basálticos	25	22,5	21	20	18	17
Alvenaria armada	36	36	36	36	36	36	

Fonte: Traduzida e Adaptada da AS 3700 (2011)

O código australiano fornece também uma tabela com os valores de espessura mínima das paredes de alvenaria para a verificação do critério de isolamento térmico. Na Tabela 6, são apresentados esses valores de referência, que levam em consideração o tipo de material utilizado nos blocos.

Tabela 6: Espessura mínima das paredes considerando o critério de isolamento térmico

Tipo de unidade da alvenaria	Espessura mínima da parede (mm)					
	Tempo de resistência ao fogo (min)					
	30	60	90	120	180	240
Cerâmica	60	90	110	130	160	180
Silicato de Calcio	50	70	90	110	135	160
Concreto com densidade						
> 1800 kg/m ³	55	80	100	120	150	180
≤ 1800 kg/m ³	55	75	90	110	135	160

Fonte: Traduzida e Adaptada da AS 3700 (2011)

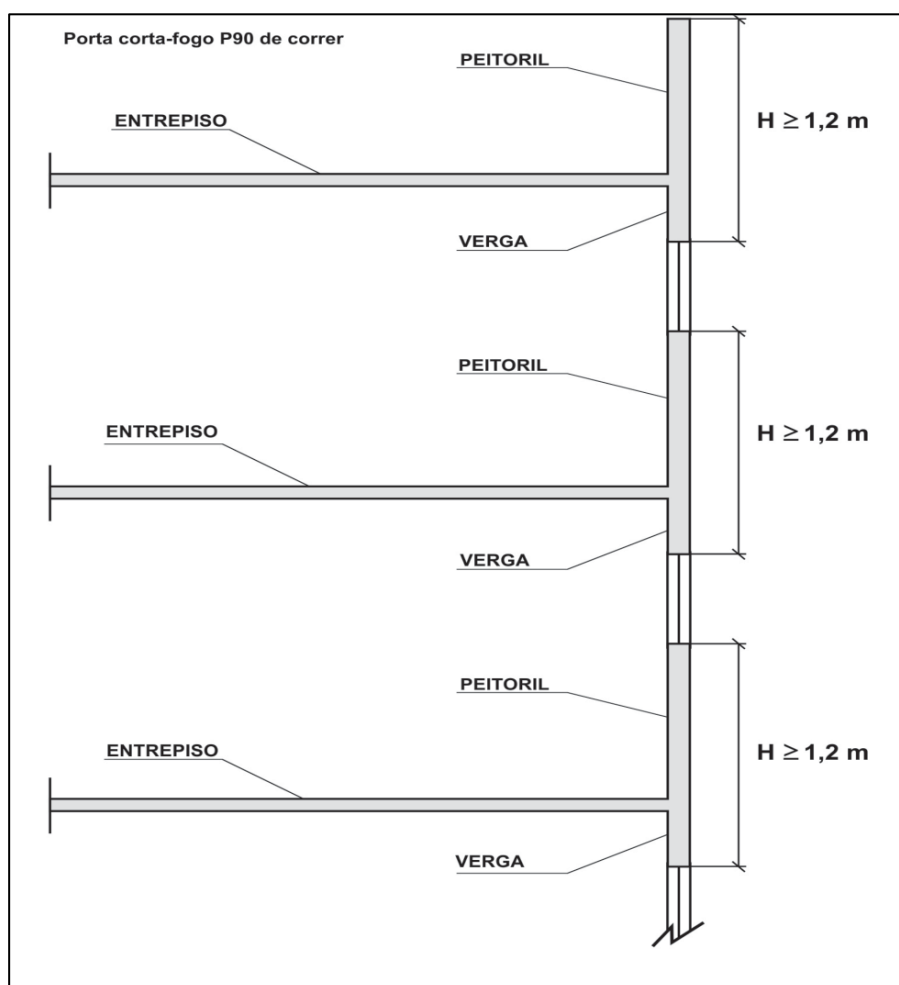
Quando os testes em laboratório não forem suficientes para o critério de integridade/estanqueidade, a parede de alvenaria poderá ser considerada como tendo um nível de resistência ao fogo satisfatório para este critério se atender aos requisitos da Tabela 5 para adequação estrutural e aos requisitos da Tabela 6 para isolamento térmico.

2.1.5 Compartimentação dos elementos estruturais

De acordo com Silva (2017) a compartimentação é fundamental na segurança contra incêndio. Essa é uma forma de proteção passiva, constituída por mecanismos incorporados à edificação que não necessitam de serem acionados no momento do incêndio, dizem Seito *et al* (2008). A compartimentação impede que o fogo se propague para fora do ambiente, quando executado de forma correta, facilitando o combate ao incêndio por parte do Corpo de Bombeiros. Ela pode ser vertical ou horizontal.

A vertical compreende dispositivos que impedem a propagação do fogo para os andares de cima ou de baixo, como por exemplo: as lajes com espessura suficiente para barrar a passagem de fumaça e gases quentes e a propagação total do calor, a distância vertical entre as aberturas de no mínimo 1,20 m, marquises e parapeitos em fachadas, isolantes verticais para fixação de fachadas de vidros, porta corta-fogo, entre outros. Na Figura 9, são apresentados alguns desses artifícios:

Figura 9: Modelo de compartimentação vertical.

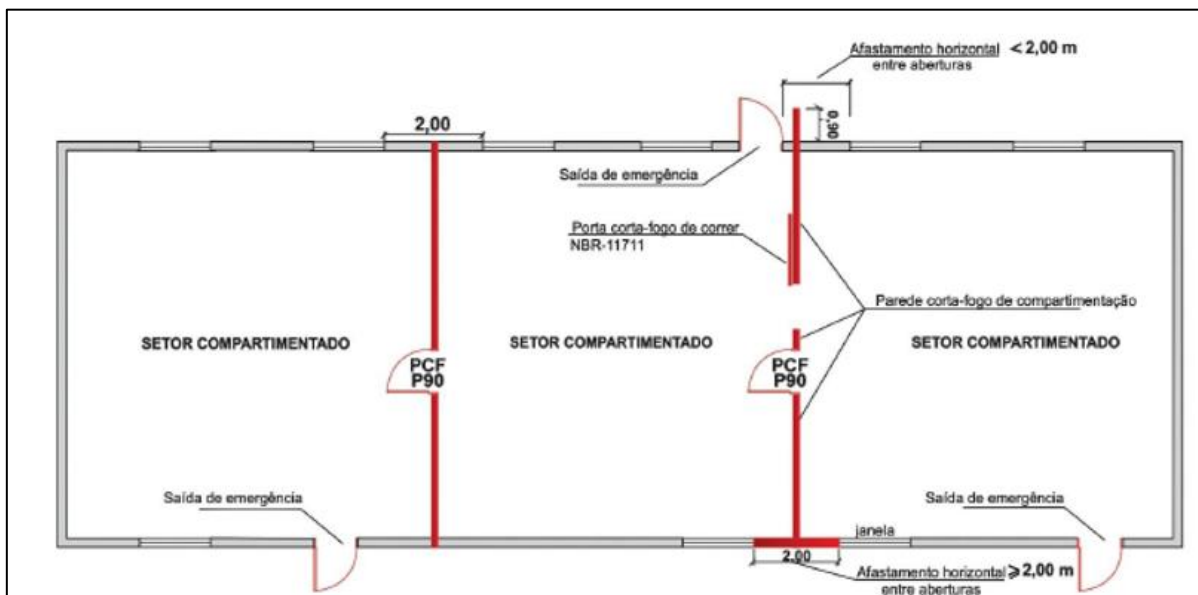


Fonte: IT 09:2019

A horizontal, que será muito explorada nessa pesquisa, consiste em um conjunto de técnicas que dificultam a propagação do fogo para os demais ambientes por meio das paredes ou até mesmo para os edifícios vizinhos, fazendo com que a estrutura não seja excessivamente prejudicada e as pessoas possam evacuar de maneira segura. São exemplos, como ilustrado na Figura 10 a seguir, a distância

mínima entre aberturas de 2,00 m na horizontal, as portas corta-fogo, paredes com materiais ou revestimentos que melhoram o isolamento térmico e a estanqueidade dos elementos, a distância entre duas construções, entre outros.

Figura 10: Modelo de compartimentação horizontal.



Fonte: IT 09:2019

2.2 ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Conforme a ABNT NBR 14432:2001, a estrutura tem que ser capaz de resistir à ação do fogo por um determinado período, respeitando a três critérios de resistência. Já o Eurocode 6 Part 1-2:2005 lista um critério adicional. Os critérios são:

- Resistência mecânica: o elemento deve suportar as solicitações durante o tempo de exposição ao fogo;
- Estanqueidade: o elemento deve impedir a passagem de chamas e gases quentes para os demais compartimentos;
- Isolamento térmico: a elevação da temperatura média deve ser inferior a 140°C na face não exposta ao fogo e não ultrapassar 180 °C em qualquer ponto da superfície em contato com fogo;
- Impacto mecânico: o elemento vertical que separa os ambientes, seja de características estruturais ou não, deverá resistir ao impacto de uma ação horizontal

com especificações definidas pela EN 1363:1999 - *Fire resistance tests - Part 2: Alternative and additional procedures*.

As pesquisas sobre alvenaria estrutural em situação de incêndio ainda são recentes no Brasil, ainda carente de resultados adicionais sobre o comportamento da alvenaria exposta à ação térmica. A seguir serão apresentados alguns estudos nacionais e internacionais sobre o assunto.

Ayala (2010) realizou uma pesquisa com pequenas paredes de tijolos de concreto leve, com dimensões de 68,5 cm de comprimento, 67 cm de altura e 10 cm de espessura, estudou também os blocos maciços e as argamassas. Ela fez avaliações por meio de análises numéricas e ensaios experimentais sob altas temperaturas. Em um primeiro instante foram realizados ensaios sem nenhum tipo de carregamento, depois de ocorrido o equilíbrio térmico inseriu-se de maneira gradual a aplicação do carregamento até sua ruptura.

As pequenas paredes de alvenaria estrutural foram aquecidas com temperaturas de 200, 400, 600, 700 e 800°C, com incrementos de 10 °C/min, a aplicação de carga se deu a uma taxa de 10 kN/min até a ruína, conforme a Figura 11.

Figura 11: Pequena parede de alvenaria estrutural sob teste de compressão antes da elevação de temperatura



Fonte: Ayala (2010).

De acordo com o autor, nas pequenas paredes houve uma redução na resistência à compressão de 9% quando a temperatura estava em 400 °C, chegando à redução de 83% quando eles estavam sujeitos a temperaturas de 800 °C. Quanto à ruptura das pequenas paredes foi observado o surgimento de fissuras na direção diagonal, e ao passar dos 400°C teve um aumento expressivo de lascamentos dos elementos. Quando os corpos de prova estavam submetidos a uma temperatura de 800°C, o módulo de elasticidade caía em torno de 98%.

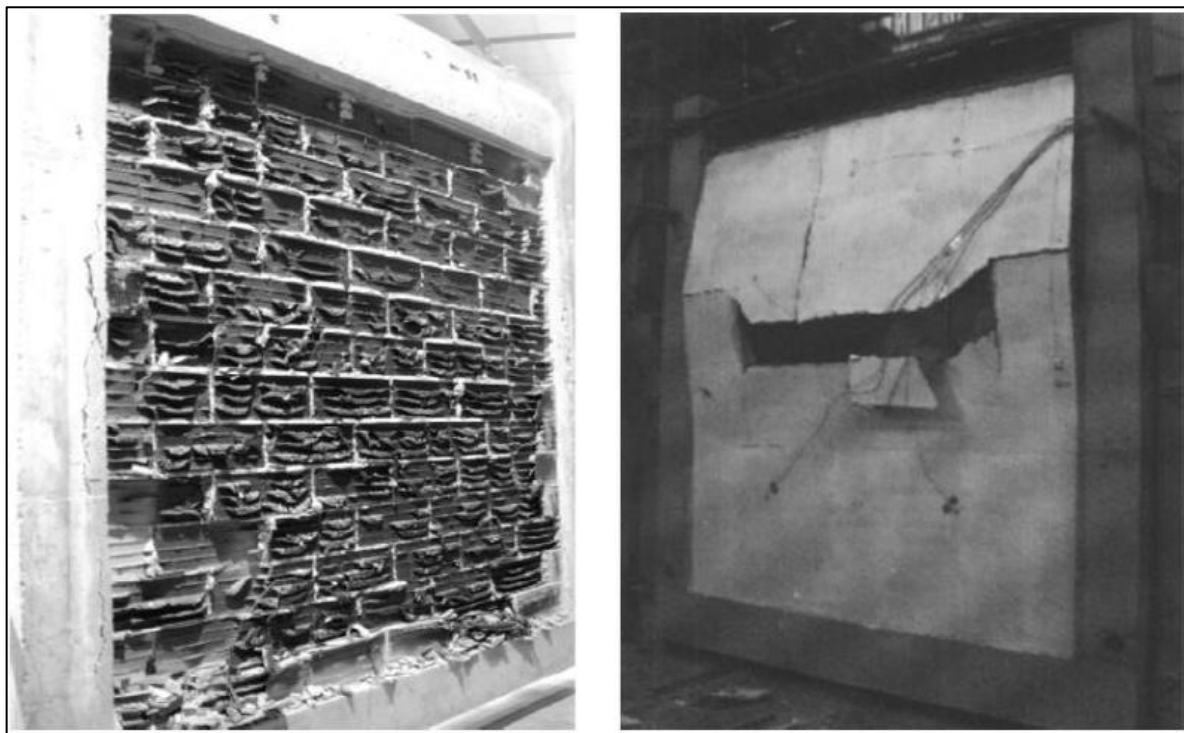
Para os blocos maciços de concreto leve, o mesmo autor relata que houve uma redução da resistência à compressão de 28% a 200 °C, chegando a 65% quando os corpos de prova atingiam temperaturas próximas a 800 °C.

Nguyen e Meftah (2012) realizaram quatro estudos com paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos em situação de incêndio variando alguns dos parâmetros. Foram utilizadas paredes com espessuras de 10 cm e 20 cm, e outras carregadas com taxas de carregamento de 90 kN/m e 130 kN/m, expostas à elevação de temperatura em apenas uma das faces em um forno vertical. Quanto as paredes que estava descarregada seus furos estavam dispostos na horizontal, já os corpos de prova carregados foram confeccionados com os furos orientados na vertical.

Os autores destacam que as paredes que não foram carregadas não apresentaram instabilidade estrutural, sendo a resistência ao fogo destas paredes controladas pelo critério de isolamento térmico. Já nas que estavam carregadas, pode-se perceber a perda de estabilidade devido ao lascamento e fragmentação localizada, que foi se propagando em toda a espessura da parede, fazendo com que houvesse um aumento dos momentos fletores que surgiram devido à indução do lascamento por conta da excentricidade das cargas verticais aplicadas, como pode ser visto na Figura 12.

Ao analisar as paredes descarregadas, Nguyen e Meftah (2012), perceberam que ao dobrar a sua espessura o tempo de isolamento térmico saltava de 43 minutos para 104 minutos. Observando os deslocamentos horizontais que apareceram na região central da face exposta ao fogo, as paredes com 10 cm de espessura possuíam deslocamentos na ordem de 67% superiores em relação às paredes com 20 cm de espessura. Eles concluíram que o fluxo de calor era maior nos furos dos blocos do que nos seus septos transversais, por meio da análise da temperatura que foi medida durante o ensaio na seção transversal dos blocos.

Figura 12: Fenômeno do lascamento em paredes de alvenaria sem carregamento e carregadas



Fonte: Adaptada de Nguyen e Meftah (2012).

Rigão (2012) em seu estudo realizou ensaios com 6 horas de duração em um forno com resistência elétrica, com o aquecimento gradual até atingir os 900°C. O autor utilizou pequenas paredes de blocos cerâmicos assentadas com argamassa industrializada, que foram construídas com as dimensões para o fechamento do forno, sendo que por meio de um macaco hidráulico aplicou uma força de compressão de 70kN sobre as paredes. Com isso ele pode concluir ao término dos ensaios, que todas as paredes apresentaram boa estanqueidade, não permitindo a passagem dos gases, além de apresentar poucas fissuras, como é apresentado na Figura 13.

Quanto ao isolamento térmico, ele destaca que a parede exposta ao fogo atingiu a temperatura de 180°C aos 70 min; já a face não exposta demorou 268 minutos. Para alcançar a temperatura média de 140°C, o tempo foi de 209 minutos. No entanto, ele faz um alerta, que esses valores não podem ser comparados com a norma nacional de segurança, uma vez que a curva de aquecimento não foi a de incêndio padrão.

Figura 13: Fissuras na face exposta ao fogo, após o ensaio.

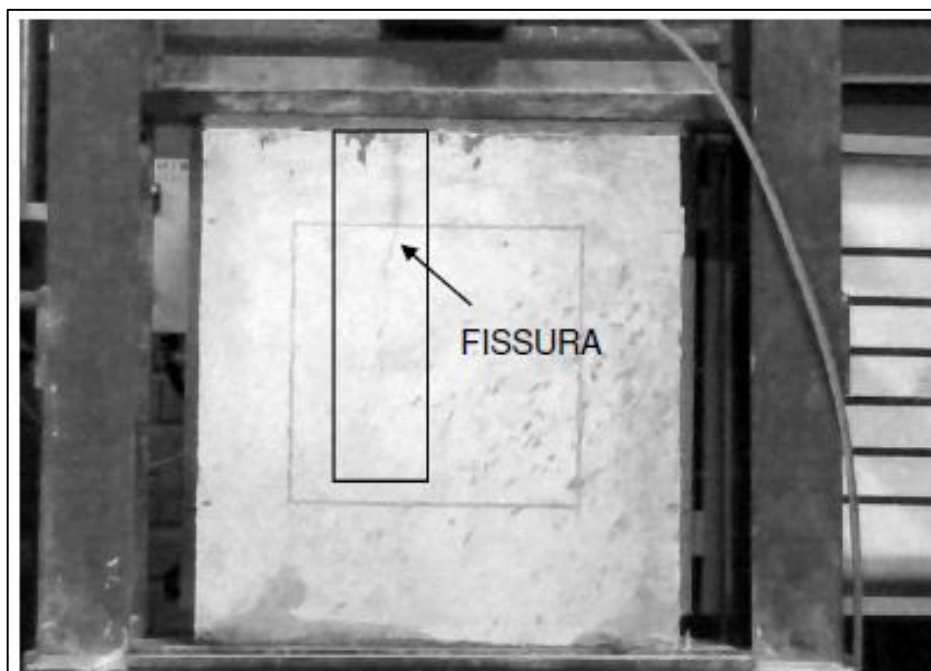


Fonte: Rigão (2012)

Cocco (2014) menciona que painéis de blocos cerâmicos revestidos com chapisco além de 2,0 cm de argamassa industrializada de um lado e 1,5 cm do outro, sem preenchimento, têm a média das temperaturas máximas maior que aqueles painéis com as mesmas características preenchidos com graute ou areia, em 65°C. Ela destaca a areia como uma melhor alternativa para proteção da alvenaria contra o fogo, devido ao seu baixo custo e seu comportamento térmico superior ao final do ensaio, em comparação aos painéis preenchidos com graute.

A autora ainda menciona que mesmo após 4 horas de ensaio realizado em um forno, com aquecimento praticamente constante a 900°C, tanto os painéis preenchidos como os não preenchidos tiveram uma boa estanqueidade e o nível de fissuração foi baixo. Na Figura 14 apresenta-se uma foto do painel preenchido com o graute depois do ensaio, em que ela demarca a aparição de uma fissura, mas garante que mesmo assim atendeu aos critérios de estanqueidade:

Figura 14: Fissura aparente no painel preenchido com graute.



Fonte: Cocco (2014)

Russo e Sciarretta (2014) investigaram de forma numérica o comportamento mecânico de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos com diferentes espessuras, 12, 25, 38 e 51 cm após serem submetidas à ação do incêndio, por meio da curva de incêndio padrão. O objetivo era encontrar relações entre a resistência dos elementos e a perda das propriedades mecânicas após a exposição ao incêndio. Eles utilizaram o software Diana simulando um teste padrão de resistência ao fogo, sendo que no estudo eles admitiram que o comportamento de fissuração quando as paredes eram submetidas ao incêndio se dava de maneira satisfatória. A partir disso, obtiveram uma redução de 49% na resistência à compressão, naquelas paredes de 25 cm, por mais que essas não tenham sofrido a pior exposição ao fogo, mostrou-se como à combinação mais desfavorável entre espessura e tempo de exposição ao fogo. Ao observar os estudos com as duas paredes mais espessas (38 e 51 cm), as resistências residuais não tiveram grandes perdas; segundo os autores isso deve-se ao fato de as espessuras influenciarem na troca de calor levando a um fluxo mais lento, o que não representa grande prejuízos ao material.

Outros trabalhos em que foram avaliadas espessuras diferentes de blocos, de forma experimental, enfatizam que aqueles com espessura de 19 cm aquecem mais lentamente que os de 14 cm. De acordo com Menegon *et al* (2017), em sua pesquisa

com blocos cerâmicos, apesar dos dois tipos de blocos terem o mesmo desempenho, quando em mini paredes assentadas com argamassa industrializadas e expostas ao fogo, na fase de aquecimento os blocos de menor espessura esquentam de forma mais acentuada, apontando para um maior isolamento térmico do ambiente quando as paredes são mais espessas. Eles consideraram no estudo um forno cuja temperatura aumentava conforme uma curva similar à da ISO 834-1:1999, aquecendo somente uma das faces da parede, e analisando os dados por meio da termografia infravermelha, onde é possível ver as diferentes fases de aquecimento., Na Figura 15 é possível ver um esquema do ensaio:

Figura 15: Esquema do ensaio realizado por Menegon et al (2017)



Fonte: Menegon *et al* (2017)

Carvalho (2019), em seu estudo numérico com os blocos de concreto, diz que as paredes de 19 cm, após 90 minutos de incêndio, apresentam uma diferença de 120°C em relação às paredes de 14 cm, quando há o aquecimento em uma única face. O autor ainda aponta que há uma redução de 7 a 9% na resistência das paredes de 14 cm com argamassamento parcial em relação às de argamassamento total e a redução de 16% nas paredes de 19 cm com argamassamento total.

Em se tratando da resistência após ao incêndio, Dupim (2019), realizou uma pesquisa com blocos de concreto, em que ensaiou pequenas paredes de forma isolada e trios compartimentados, assim como é feito nessa pesquisa, considerando o aquecimento de acordo com a curva de incêndio-padrão. Ele comparou as resistências residuais e declarou que, sem carregamento, a resistência residual cai de 46% em paredes compartimentadas para 14% em paredes não compartimentadas. Na Figura 16, é possível visualizar como ficaram as paredes compartimentadas após sair do forno, antes de serem ensaiadas à compressão.

Figura 16: Modo de ruptura das paredes compartimentadas após o ensaio



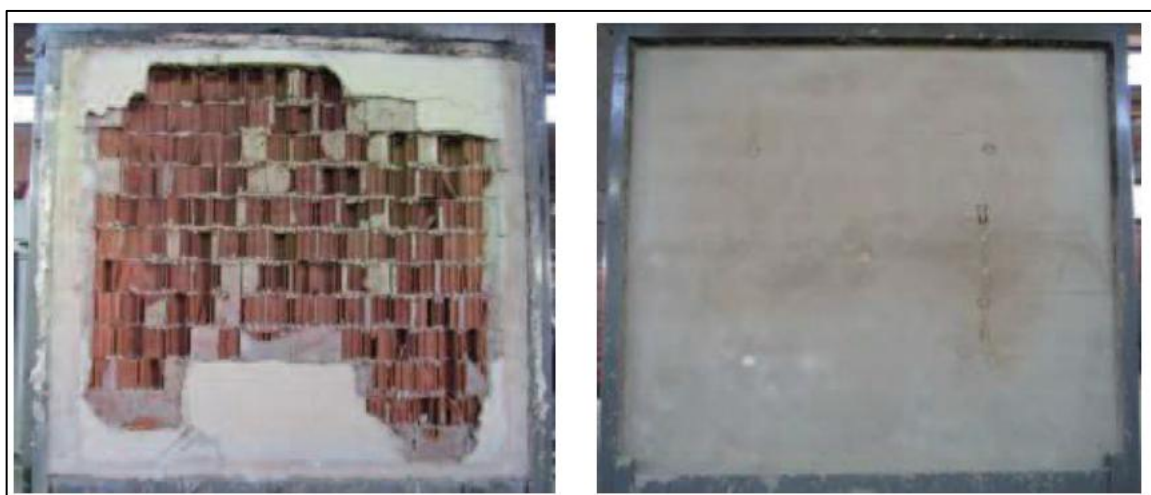
Fonte: Dupim (2019)

Em casos de incêndio, o fogo geralmente é exposto em uma única face e isso faz com que haja uma diferença de temperatura entre as faces opostas, devido à baixa condutividade da alvenaria, provocando uma curvatura na parede, em virtude da diferença de expansão térmica nas faces. Esses deslocamentos laterais induzidos, em conjunto com a degradação do material, levam ao colapso da estrutura mais rapidamente dependendo das condições de contorno, da carga aplicada e da geometria da parede. (NADJAI *et al*, 2006)

Quando as paredes apresentam instalações elétricas e hidráulicas embutidas, a seção transversal considerada deve ser uma seção equivalente reduzida e isso pode levar a problemas ainda maiores quando submetidas a um incêndio. No entanto,

Bueno (2019) realizou um estudo com paredes de blocos cerâmicos, e concluiu que durante um tempo de 240 min, os critérios de estanqueidade e estabilidade foram atendidos, apresentando somente algumas fissuras, mesmo com o deslocamento do revestimento na parte exposta ao fogo, como é visto na Figura 17 abaixo. Ele utilizou em sua pesquisa argamassa de assentamento pré-misturada com aplicação apenas nos septos longitudinais (argamassamento parcial), e as paredes foram revestidas com 0,5 cm de chapisco e 1,5 cm de argamassa industrializada estabilizada. O ensaio foi realizado em um forno com aquecimento conforme a curva de incêndio padrão.

Figura 17: Parede após o término do ensaio, ao lado esquerdo a face exposta ao fogo e ao lado direito a face não exposta com apenas algumas fissuras.



Fonte: Bueno (2019)

Em um estudo de análise do comportamento da argamassa, grautes e prismas com blocos de concreto em situação de incêndio, Leal (2023), indica que prismas com blocos de 6MPa e argamassa convencional de 5MPa, quando submetidos a temperaturas constantes de 200, 400, 600 e 800, apresentaram resistência residual de 101%, 110%, 74% e 24% respectivamente. Os prismas foram submetidos ao aquecimento até chegar à temperatura de interesse, e posteriormente o forno se manteve ligado por mais 60 minutos.

Na Tabela 7 tem-se um resumo do que foi apresentado até o presente momento para uma visualização sintética das informações:

Tabela 7: Resumo das informações apresentadas até o momento.

Referência	Bloco	Argamassa	Revestimento	Aquecimento	Observações
Ayla (2010)	Tijolo de concreto leve	Tradicional produzida in-loco. Argamassamento total	-	Temperaturas constante com incremento de 10°C/min	Nas pequenas paredes houve uma redução na resistência à compressão de 9% a 83% Quanto à ruptura, observou fissuras na direção diagonal, e ao passar dos 400°C teve um aumento expressivo de lascamentos dos elementos. O módulo de elasticidade caiu até 98%.
Rigão (2012)	Bloco Cerâmico	Industrializada	-	Gradual até atingir os 900°C	Todas as paredes apresentam boa estanqueidade e pouca fissuração. O tempo para atingir a temperatura média de 140°C na face oposta foi de 209 min e de 70 min para atingir os 180° C da fase em contato com o fogo
Nguyen e Meftah (2012)	Bloco Cerâmico	Tradicional produzida in-loco. Argamassamento total	-	Curva de incêndio-padrão	Ao dobrar a espessura o tempo foi de 43 minutos para 104 minutos. Os deslocamentos foram na ordem de 67% maior nas paredes de menor espessura. Fluxo de calor maior nos furos dos blocos.
Cocco (2014)	Bloco Cerâmico	Industrializada	Apresenta chapisco e 2,0 cm na face interna e 1,5 cm na face externa de argamassa industrializada	Total de 900°C	Painéis sem preenchimento apresentam temperaturas máximas maiores em 65°C em relação aos preenchidos com graute ou areia. Todos apresentam boa estanqueidade e pouca fissuração
Menegon <i>et al</i> (2017)	Bloco Cerâmico	Industrializada	-	Similar a curva de incêndio-padrão até atingir 900°C	Blocos de maior espessura apresentam um maior isolamento térmico
Carvalho (2019)	Bloco de Concreto	Propriedades retiradas de ensaios experimentais. Utilizou argamassamento parcial e total	-	Curva de incêndio-padrão	Paredes de 19 cm apresentam uma diferença de 120°C em relação as de 14 cm. Existe uma redução de 7 a 9% na resistência com argamassamento parcial em relação as de argamassamento total
Dupim (2019)	Bloco de Concreto	Tradicional produzida in-loco. Utilizou argamassamento total	-	Curva de incêndio-padrão	A resistência residual de paredes não carregadas cai de 46% para 14% quando não são compartimentadas
Bueno (2019)	Bloco Cerâmico	Pré misturada. Utilizou argamassamento parcial	0,5 cm de chapisco e 1,5 cm de argamassa industrializada estabilizada	Curva de incêndio-padrão	Apareceram algumas fissuras na parede não exposta ao fogo e deslocou o revestimento na parte exposta ao fogo

Fonte: Próprio Autor

2.3 REVESTIMENTO EM ALVENARIA ESTRUTURAL

As normas brasileiras de alvenaria estrutural para blocos cerâmicos não são claras quanto ao tipo de revestimento permitido em condições ambientes e muito menos em situação de incêndio. Nessa situação, recomendam-se parâmetros das normas internacionais. Segundo o Eurocode 06 Part 1-2:2005, os revestimentos adequados para suportar a elevadas temperaturas são as argamassas de gesso conforme a BS EN 1996-1-2:2005, e as argamassas do tipo termo isolante ou leve conforme a BS EN 998-1:2010 – *Specification for mortar for Masonry, Part 1: Rendering and plastering mortar*. No Brasil os materiais que mais se assemelham às características apresentadas por essas argamassas permitidas internacionalmente são as argamassas especiais do tipo corta-fogo e as placas de gesso acartonado resistente ao fogo, que segundo os fabricantes resistem bem a elevadas temperaturas.

Em outros sistemas construtivos, como por exemplo nas estruturas metálicas, os revestimentos utilizados no Brasil são as argamassas projetadas. Em concordância com Regobello (2007), elas são econômicas, porém o seu acabamento não é o mais adequado, pois o aspecto é o de uma parede com chapisco. Os revestimentos em concreto variam bastante, como por exemplo as tintas intumescentes, argamassa com fibras e até mesmo as argamassas projetadas utilizadas em estruturas metálicas. Empresas como a CKC (2021) e a R3D Engenharia (2021) afirmam que essa tinta pode ser utilizada em alvenaria, no entanto essas afirmações são baseadas em normas internacionais ou em ensaios realizados pela empresa, levando em consideração parâmetros permitidos no Brasil, uma vez que ainda não existe uma norma brasileira específica que os regularize.

Apesar de o assunto ser recente em pesquisas, já existem alguns resultados que contribuem de forma significativa para o andamento dos estudos em alvenaria estrutural. Oliveira (1998), em um estudo teórico de algumas normas nacionais e internacionais, apresenta equações para encontrar o tempo de resistência ao fogo por meio da espessura equivalente. Ele explica que o revestimento aumenta a espessura equivalente da parede e com isso o tempo de resistência ao fogo, mas ressalva que isso ocorre até o instante em que esse

revestimento permanece aderido à parede. Com isso, a escolha do revestimento e o método de aplicação se torna bastante relevante.

De acordo com Rosemann (2011), analisando somente o critério de isolamento térmico, o tempo de resistência ao fogo da parede cerâmica de 14 cm, revestida com 1,5 cm de argamassa mista de cimento e cal, seria de 196 min, enquanto a não revestida é de 106 min, significando um aumento de 85% na resistência. Souza (2017) afirma que o tempo de resistência ao fogo para paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos de 14 cm não carregadas revestidas nas duas faces com 2,5 cm de argamassa tradicional de cimento é de 240 min e quando carregadas com 10 tf/m é de 221 min, sendo que o tempo que uma estrutura deve resistir de acordo com NBR 14432:2001 é de 120 min. O autor certifica que nesses dois casos esse tempo foi suficiente para atender aos critérios de estanqueidade, estabilidade estrutural e isolamento térmico.

Bueno (2019) assegura que os revestimentos com argamassa industrializada a base de cimento aumentam o desempenho térmico das paredes. Em seu estudo, os revestimentos pouco se soltaram do bloco, sendo somente na face que estava exposta ao fogo, favorecendo o isolamento térmico. Rodovalho (2018) mostra em seu estudo teórico que um bloco é capaz de aumentar o tempo requerido de resistência ao fogo, exigido pela NBR 14432:2001, de 60 min para 120 min quando revestido com 1,5 cm de argamassa em cada face, sendo que em seu estudo numérico as propriedades utilizadas na argamassa foram as mesmas utilizadas para o bloco de concreto, utilizada em ensaios realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – USP no mesmo período.

Cunha (2013) realizou um ensaio de 7 horas e 40 minutos em um forno com aquecimento conforme a equação apresentada na ABNT NBR 5628:2022, até o máximo de $900^{\circ}\text{C} \pm 5\%$ em paredes de blocos cerâmicos revestidos com gesso. Ela constatou que a face da parede não exposta ao fogo atingiu apenas 130°C de aumento médio de temperatura, ou seja, abaixo do permitido pela NBR 14432:2001, que é de 140°C , acrescentando que no interior dos vazios dos blocos chegou a 838°C . De acordo com a autora, visualmente a parede apresentava pouca fissuração e a olho nu não era possível perceber deslocamentos transversais significativos, nem deformações. Apesar disso, na

face aquecida o revestimento deslocou, devido ao gesso não resistir à absorção do calor aplicado.

Dupim (2019) diz, a partir dos seus resultados obtidos com os blocos de concreto, que os elementos submetidos a ação térmica que não foram revestidos não apresentaram resistência residual suficiente para garantir segurança, mesmo considerando a redução dos esforços de cálculo, levando em conta a natureza das cargas excepcionais. Leal (2022), em sua pesquisa com blocos de concreto de paredes vazadas de 14 e 19 cm, constatou que paredes revestidas 10 mm de argamassa, com chapisco mais emboço de cimento cal e areia apresentava uma redução considerável nas temperaturas no interior da alvenaria; em um ponto a 20 mm da face exposta ao fogo o tempo superou 70 minutos para atingir 500°C, sendo muito superior em relação à sem revestimento que demorou um pouco mais de 30 minutos

A seguir destacam-se alguns estudos relacionados aos materiais que se encontram nos mais diversos revestimentos e que possuem propriedades que ajudam no isolamento térmico:

2.3.1 Fibras de polipropileno

Segundo Centofante e Dagostini (2014) por mais que as fibras sejam hidrofóbicas seu formato favorece a adição em argamassa servindo como uma barreira para a saída da água, que consegue permanecer por mais tempo em seu interior, melhorando a hidratação e diminuindo as fissuras do revestimento. Tanesi e Agopyan (1997) também dizem que, devido ao baixo módulo de elasticidade, as fibras proporcionam uma maior rigidez, permitindo um controle maior da propagação das fissuras, com evidente benefício.

Vários estudos voltados para materiais cimentícios afirmam que o teor de fibras interfere muito na composição da mistura, pois, dependendo da quantidade, as fibras começam a influenciar demais nas características do material, sendo que Carvalho (2006) aconselha 2 kg de fibras para cada m³ de concreto. Alguns outros autores indicam sempre consultar os fabricantes pois esses determinam uma faixa ótima para o desempenho tanto do concreto, como das argamassas.

Uma das formas de conter a ação térmica em estruturas de concreto consiste em acrescentar microfibras de polipropileno ao revestimento, como afirma Ciriades (2018). Ele explica que as microfibras de polipropileno se derretem entre 150 e 175 °C liberando espaços no concreto, e esses poros são capazes de armazenar vapores e gases reduzindo as suas pressões, impedindo o lascamento das camadas de concreto e mantendo a espessura da parede integra por mais tempo, evitando o aumento da temperatura na face oposta. Esse sistema foi usado nos túneis da Serra do Cafezal na BR-116, onde adicionou-se uma camada de 6 cm de revestimento de concreto com 2kg/m³ de microfibras de polipropileno do tipo FibroMac6, em um concreto projetado de 20 MPa, à base de cimento CP-III-32.

2.3.2 Incorporador de ar

Os aditivos quando inseridos na dosagem correta da argamassa têm a função de modificar algumas características e melhorar o seu desempenho, sendo que os incorporadores de ar por sua vez aumentam a trabalhabilidade, diminuem a massa específica, reduzem a tendência de exsudação, entre outras. Mas é preciso tomar cuidado com o teor utilizado nos revestimentos, pois isso pode levar à perda de aderência.

Conforme Romano *et al* (2018), no estado endurecido esses aditivos melhoram as propriedades elásticas, térmicas e acústicas das argamassas de revestimento, mas em compensação diminuem a resistência mecânica por causa da alta permeabilidade.

Os aditivos incorporadores de ar criam propositalmente bolhas de ar na mistura, diz Qiao *et al* (2017), o que pode ser uma vantagem no revestimento quando em contato com o fogo, uma vez que, assim como nos revestimentos com fibras de polipropileno, os gases e vapores provocados pela ação térmica poderão ser liberados mais rapidamente, reduzindo assim as temperaturas na outra face da parede.

2.3.3 Pintura especial

As tinturas intumescentes são utilizadas abundantemente em estruturas de aço. Sales *et al* (2019) ressaltam que, sob influência do calor, o material se expande devido à reação dos componentes ativos, podendo aumentar até sessenta vezes sua espessura de aplicação. Os autores informam que o revestimento com tinta intumescente corresponde a mais de 40% dos materiais de proteção térmica utilizados em países do exterior em grandes edifícios.

Oliveira *et al* (2017) esclarecem que as tintas intumescentes são compostas de elementos químicos que passam por muitas reações quando em contato com elevadas temperaturas, formando uma espuma carbonizada com alto desempenho isolante. Os autores ainda ressaltam algumas vantagens desse tipo de revestimento: como o bom acabamento e a durabilidade; por se tratar de um material leve, o acréscimo de carga se torna insignificante para a estrutura mesmo após seu aumento de volume; ele possui uma aplicação simples, não requer fixação e a manutenção é bastante facilitada, além do fato de que essa tinta não modifica as propriedades intrínsecas do substrato.

Santos Sales *et al* (2019) realizaram ensaios em blocos cerâmicos para vedação aplicando a tinta na superfície e expondo-a a ação térmica com chamas aplicadas diretamente por 60 minutos, como pode-se ver na Figura 18 a seguir. Foi possível concluir que nas faces opostas à aplicação da chama, os blocos sem revestimento tiveram uma temperatura 170% maior em relação àqueles que apresentavam a tinta. Quando comparada a resistência residual à compressão dos blocos, aqueles com proteção suportavam 70% mais, sendo que os sem proteção nem atingiram a resistência mínima estabelecida por norma.

Figura 18: Aplicação da chama na superfície onde foi aplicada a tinta intumescente.



Fonte: Sales *et al* (2016)

2.3.4 Gesso

Utilizado em várias maneiras diferentes nos revestimentos, é possível encontrá-lo na forma de pasta de gesso (gesso e água), argamassa de gesso (gesso, água e areia) ou ainda placa de gesso, conhecido como Drywall. Hoje no Brasil se utiliza bastante a pasta de gesso e as placas de gesso, sendo que as argamassas de gesso não são muito comuns, uma vez que engenheiros e arquitetos ainda optam preferencialmente pela argamassa de cimento para os revestimentos argamassados.

Peres, Benachour e Santos (2001), explicam que devido à baixa condutividade térmica do gesso, os revestimentos que possuem esse material em sua composição melhoram sensivelmente o isolamento térmico. Canut (2006) também confirma que o gesso é um ótimo isolante térmico e completa que é um dos materiais com melhor resistência e menor poder de deterioração diante da ação do fogo.

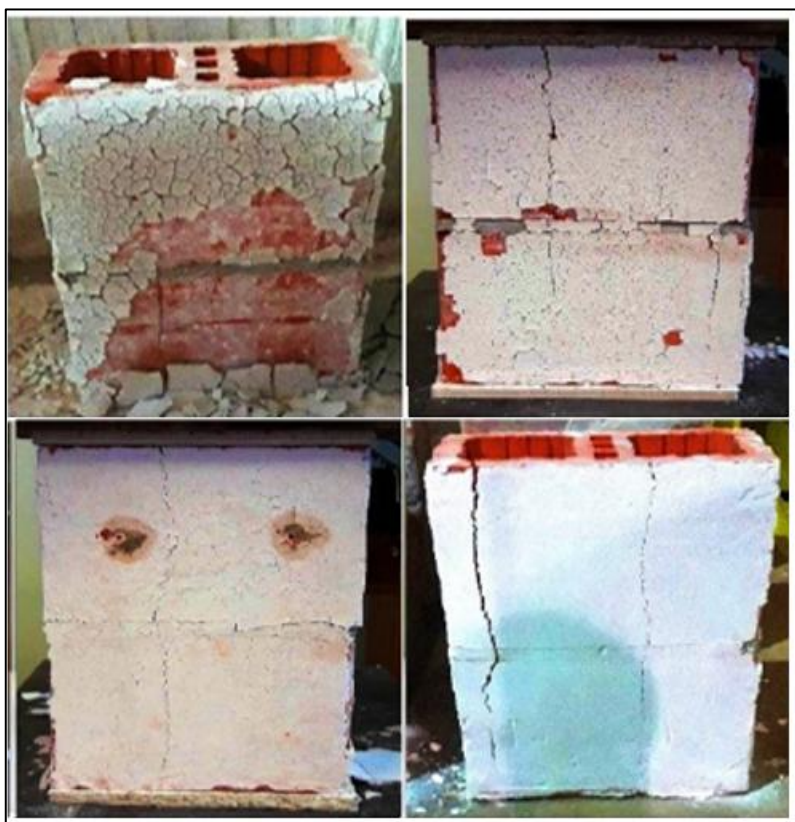
John e Antunes (2002) afirmam que as argamassas de gesso são interessantes quando analisadas as suas resistências de aderência aos blocos cerâmicos e de concreto, mas que não é viável aplicar água na superfície antes de aplicá-las e o controle da relação água/gesso deve ser rigoroso, pois esses dois fatores influenciam bastante na aderência.

A eficiência ao fogo do gesso ainda é bastante questionada por alguns autores, como é o caso de Taylor (2004), embora ela concorde que o gesso é capaz de trazer conforto térmico ao ambiente. Outros como é o caso de Silva e Silva (2004), não questionam, elas asseguram que o gesso apresenta excelente resistência ao fogo, dispensando até as verificações, por se tratar de um material mineral, e assim incombustível. Elas ainda dizem que o calor gerado pelo aumento da temperatura é consumido pelas moléculas de água no início do incêndio, retardando o aquecimento das paredes.

Conforme estudo realizado por Dupim (2019), em blocos de concreto, as paredes revestidas com pasta de gesso começaram a fissurar com 55 minutos, quando o gesso se despreendeu dos blocos, enquanto as sem revestimento aos 45 minutos. O autor também afirma que, nas paredes onde o gesso permaneceu aderido até o fim do ensaio, não foi possível visualizar fissuras e que mesmo depois de retirado o material, as fissuras aparentes eram poucas. Ele ainda ressalta que com 70 minutos de ensaio as temperaturas eram 10% menores comparados aos blocos sem revestimento, supondo que o gesso tenha impedido a passagem de calor, principalmente enquanto ainda aderido à parede.

Fernandes Neto (2020) em sua pesquisa com blocos cerâmicos, relata que os revestimentos com argamassa de gesso possuem um comportamento mais satisfatório, como se vê na Figura 19, em relação à pasta de gesso, quando submetido a um incêndio, pelo fato de a pasta de gesso perder água mais rapidamente e se desprender da parede em menor tempo.

Figura 19: Prismas revestidos após a situação de incêndio. O primeiro prisma foi revestido com pasta de gesso e os demais com argamassa de gesso.



Fonte: Editado de Fernandes Neto (2020)

2.3.5 Vermiculita

Dentre as aplicações da vermiculita na construção civil, Szelwar e Scalabrin (2009) citam: a utilização como agregados de concretos leves, de argamassas acústicas e térmicas para revestimentos de paredes e teto, para enchimento de espaços em alvenarias, na composição de argamassas projetáveis para revestimento “antifogo” de estruturas metálicas, como componente de divisórias retardantes ao fogo e proteção térmica de impermeabilizantes em lajes expostas ao tempo, em fossos para piscinas de vinil como camada de apoio e amortecimento, entre outros.

Azevedo (2017) afirma que a vermiculita expandida tem características interessantes quando se trata de isolamento termoacústico, e que isso deve-se ao fato de ter uma baixa condutividade térmica, que é em média de $0,068\text{W/m}^\circ\text{C}$. A vermiculita expandida é obtida por meio do aquecimento da vermiculita natural

a uma temperatura entre 800°C e 1000°C, em que o material chega a se expandir 30 vezes. Ugarte (2008) declara que esse processo de expansão da vermiculita confere-lhe resistência ao fogo, propriedades isolantes térmicas e acústicas, adesão, dentre algumas outras características.

Em seu estudo com argamassas compostas de gesso e vermiculita expandida, Azevedo (2017), pode concluir que conforme aumentou o teor de vermiculita a capacidade de isolamento subiu, sendo as misturas com 15% e 20% de vermiculita as mais eficientes e que conforme aumentava a relação água/gesso desse composto a capacidade de isolamento térmica era reduzida.

Oliveira (2009) disserta em uma parte da sua pesquisa sobre o desempenho térmico de uma placa composta de gesso e vermiculita quando aplicada em alvenaria. Afirma que o fluxo de calor nas paredes com essa placa reduziu em 32,1% em relação às paredes sem revestimentos, sendo um fluxo menor do que nas placas com apenas gesso.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS, COMPONENTES E ELEMENTOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL

As principais etapas do programa experimental foram desenvolvidas dividida em três etapas. A primeira delas, que será retratada nesse capítulo, referente à caracterização dos blocos e argamassa de assentamento e revestimento, foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos (LMCC - EESC), sendo realizados apenas aqueles ensaios imprescindíveis para a caracterização do material e reprodução da pesquisa, uma vez que esse trabalho ocorreu durante a pandemia do coronavírus e precisou se adequar aos cronogramas do laboratório e de todo o Departamento. A segunda etapa, relativa à caracterização dos prismas e pequenas paredes e a terceira etapa, que envolveu a simulação de incêndio, foram desenvolvidas no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE - EESC).

Neste capítulo serão descritas as principais etapas da caracterização em temperatura ambiente de todos os materiais empregados. As unidades cerâmicas foram avaliadas quanto às suas propriedades geométricas, físicas e mecânicas através de ensaios de compressão, e a alvenaria estrutural teve o seu comportamento verificado mediante ensaios de compressão em prismas e pequenas paredes. Além disso, também foram analisadas as principais propriedades das argamassas de assentamento e revestimento utilizadas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES DE ALVENARIA

Como já mencionado, o período da pesquisa se deu em ano de muitos imprevistos, tendo que se adequar o programa experimental ao mínimo necessário. Optou-se pela caracterização mínima dos materiais, sendo realizados aqueles ensaios em que os resultados eram indispensáveis para um resultado satisfatório da pesquisa.

Os blocos de alvenaria estrutural escolhidos foram os blocos cerâmicos de parede vazada de 6 MPa, com espessura nominal de 140 mm, cedidos pela empresa Palma de Ouro, e alinhados com as demais pesquisas que já haviam

sido realizadas no Departamento. Primeiramente foi feito a inspeção visual, tanto dos blocos, quanto dos meio-blocos, conforme estabelecido na ABNT NBR 15270 – 1: 2017 – Componentes cerâmicos – Blocos de tijolos para alvenaria – Parte: 1 – Requisitos, já que a pesquisa foi realizada antes da atualização da norma em 2023.

Todos os blocos e meio-blocos em que foram detectados com defeitos sistemáticos, como fissuras, superfícies irregulares e deformações excessivas que inviabilizariam a sua utilização, foram descartados e separados somente aquele aptos para utilização, para posterior caracterização do lote, como visto na Figura 20:

Figura 20: Blocos de cerâmica, de parede vazada, com resistência de 6Mpa



Fonte: Próprio Autor

Foram realizados os ensaios conforme a ABNT NBR 15270 – 2: 2017 – Componentes cerâmicos – Blocos de tijolos para alvenaria – Parte: 2 – Métodos de ensaios, sendo que para a caracterização geométrica foram realizados os ensaios de Dimensão Efetiva, Espessura da paredes, Desvio e Planeza das faces e Área Bruta e Área Líquida, para a caracterização física, os ensaios de Massa Seca e Índice de Absorção d'água e para finalizar a caracterização, foi realizado o ensaio de Resistência à Compressão Característica. Para a

caracterização dos corpos de prova, prismas e pequenas paredes, foram realizados os ensaios de Resistência a Compressão Característica, conforme a ABNT NBR 16868 – 3: 2020 – Alvenaria Estrutural – Parte 3: - Método de Ensaio. Esses ensaios serão mais bem detalhados a seguir, assim como serão apresentados os resultados encontrados.

As dimensões e resistências nominais dos blocos e dos meio-blocos são as seguintes:

Bloco:

- Resistência: 6MPa
- Largura: 140 mm
- Altura: 190 mm
- Comprimento: 290 mm

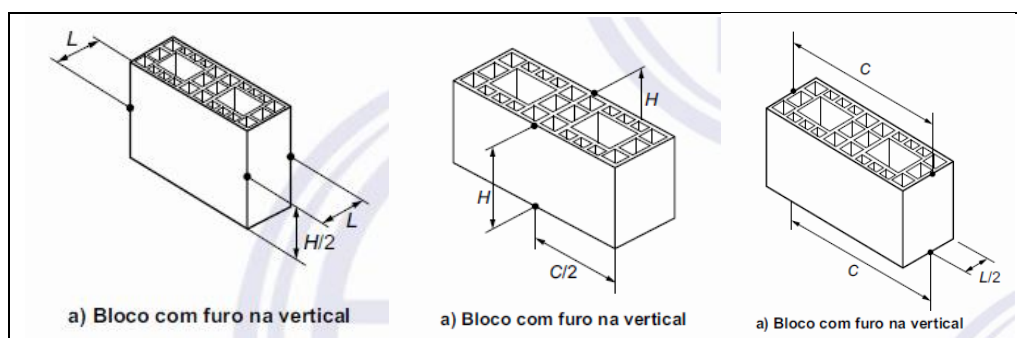
Meio-Bloco:

- Resistência: 6MPa
- Largura: 140 mm
- Altura: 190 mm
- Comprimento: 140 mm

3.1.1 Propriedades geométricas

As propriedades geométricas são as medidas reais dos blocos e meio-blocos. Para isso foram utilizados um paquímetro com sensibilidade de 0,01 mm e curso total de 150 mm, uma régua com resolução de 1 mm, um esquadro metálico de 90°, uma balança digital com resolução de 0,1 g e 13 blocos e 13 meio-blocos, conforme as recomendações da ABNT NBR 15270-2:2017. Para a determinação das dimensões efetivas, as medidas foram feitas conforme a Figura 21 abaixo:

Figura 21: Dimensões Efetivas dos blocos de alvenaria estrutural

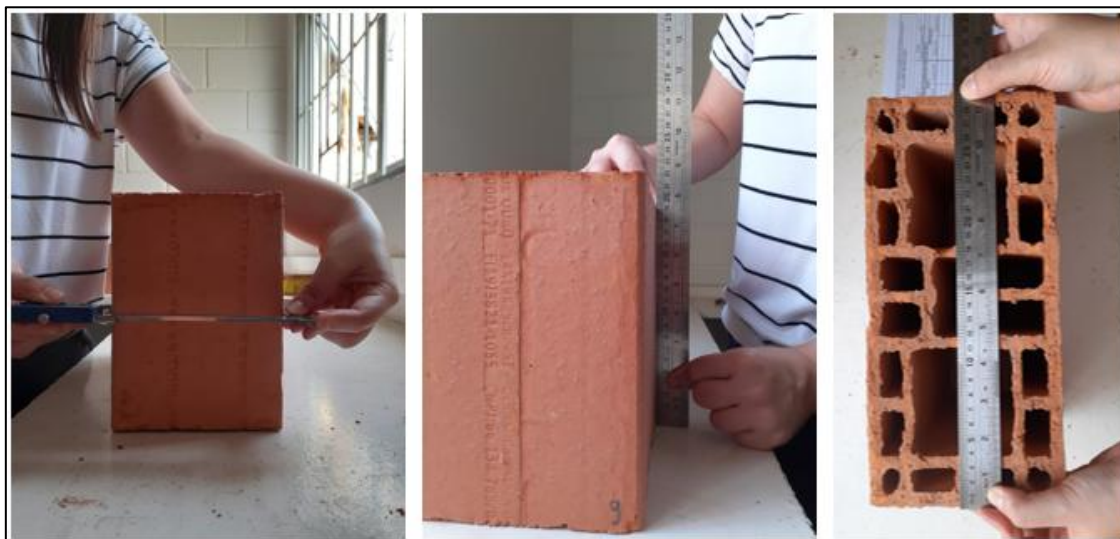


Fonte: NBR 15270-2 (2017)

Para obter as medidas, os blocos e meio-blocos foram dispostos sobre uma superfície plana e indeformável. As medidas obtidas são resultadas da

média entre as medições realizadas em duas faces opostas da largura, comprimento e da altura, conforme observado na Figura 22. Na Tabela 8, são apresentadas as médias encontradas para os 13 corpos de prova dos blocos e meio-blocos:

Figura 22: Ensaio para determinação das dimensões efetivas



Fonte: Próprio autor

Tabela 8: Dimensões médias efetivas das unidades cerâmicas (mm)

	BLOCO			MEIO BLOCO		
	Largura	Altura	Comprimento	Largura	Altura	Comprimento
Média	140,33	190,92	290,77	141,14	191,83	140,43
DP	0,50	1,50	1,24	1,41	0,88	1,27
CV (%)	0,36	0,78	0,42	1,00	0,46	0,90

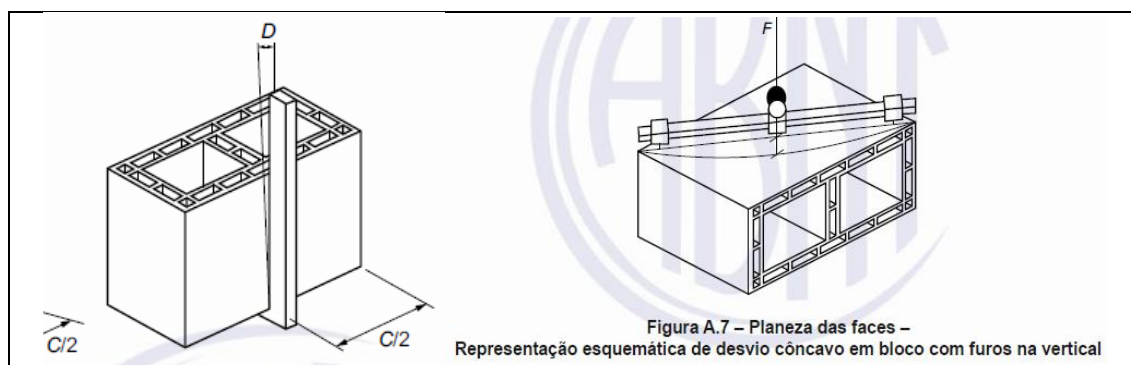
Fonte: Próprio autor

Segundo a ABNT NBR 15270-1:2017 a tolerância é de $\pm 3,0$ mm para valores individuais, observando-se que todas as unidades medidas atenderam às recomendações.

Para obtenção das medidas dos septos e das paredes externas, foi utilizado o paquímetro com sensibilidade de 0,01 mm, com escolha das menores

espessuras, sendo quatro medidas para a parede externa e quatro medidas para os septos. Os valores obtidos na Tabela 9 são a média de todos os valores coletados. Posteriormente foi necessário achar o desvio em relação ao esquadro e a planeza das faces, conforme a Figura 23.

Figura 23: Medida do desvio e planeza das faces dos blocos de alvenaria estrutural



Fonte: NBR 15270-2 (2017)

Para encontrar o desvio, foi utilizado o esquadro metálico rente à base do bloco, e o paquímetro para medir a distância entre a parte de cima da face lateral do bloco e o esquadro. Já para planeza das faces, o procedimento foi semelhante, devido à falta de disponibilidade de deflectômetros no Laboratório de Estruturas. Foram utilizados a régua metálica e a medida de profundidade com um paquímetro, conforme apresentado na Figura 24. Os valores médios também estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Espessura dos septos e paredes externas, desvio em relação ao esquadro e planeza das faces (mm)

	Paredes externas	Septos	Desvio do esquadro	Planeza das faces	Paredes externas	Desvio do esquadro	Planeza das faces
	BLOCO				MEIO BLOCO		
Média	9,522	7,212	0,988	1,508	9,293	1,428	0,928
DP	0,173	0,050	0,430	0,717	0,333	0,761	0,487
CV (%)	1,817	0,689	43,527	47,505	3,579	53,256	52,512

Fonte: Próprio autor

Figura 24: Ensaio para determinação da planeza das faces



Fonte: Próprio Autor

De acordo com a NBR 15270-1 (2017), para a resistência característica nominal de 6MPa, os blocos com paredes vazadas, precisa-se de uma espessura mínima das paredes externas e septos respectivamente de 8,0 e 7,0 mm. Em relação ao desvio e planeza das faces, deverão ser inferiores a 3,0 mm. Com isso, todas as medidas foram atendidas e o lote foi aprovado.

A última etapa da caracterização geométrica dos elementos é o cálculo da área bruta e da área líquida. A área bruta é calculada por meio do produto entre a largura e comprimento efetivos de cada unidade, sem descontar os vazios. Para o cálculo da área líquida utiliza-se o princípio de Arquimedes, ou seja, verifica-se o volume de água deslocado por meio da diferença entre as massas aparente e saturada das unidades, conforme a Equação 10:

$$A_{liq} = \frac{M_u - M_a}{\gamma * h_b} * 1000 \quad (10)$$

Onde:

A_{liq} : área líquida da unidade (em mm²);

M_u : massa do bloco saturado (em g);

M_a : massa aparente do bloco, obtida através de pesagem hidrostática (em g);

γ : massa específica da água, admitido como 1 g/cm³;

h_b : altura do bloco (em mm).

A Figura 25 ilustra o procedimento para determinação da área líquida, e em seguida, a Tabela 10 apresenta os resultados médios de área bruta, líquida e a relação para os blocos e meio-blocos cerâmicos utilizados.

Figura 25: Etapas do ensaio para determinação das Áreas líquida e bruta



Fonte: Próprio Autor

Tabela 10: Área bruta, área líquida e relação $\frac{A_{liq}}{A_{Bruta}}$

	BLOCO			MEIO BLOCO		
	Área Bruta mm^2	Área Líquida mm^2	$\frac{A_{liq}}{A_{Bruta}}$ (%)	Área Bruta mm^2	Área Líquida mm^2	$\frac{A_{liq}}{A_{Bruta}}$ (%)
Média	40804,20	14949,30	36,64	19820,22	8079,43	40,76
DP	245,63	168,69	0,28	285,77	118,08	0,33
CV (%)	0,60	1,19	2,18	1,44	1,36	0,81

Fonte: Próprio autor

3.1.2 Propriedades físicas

Para a avaliação das características físicas dos corpos de prova de alvenaria estrutural, foram obtidas a massa seca e o índice de absorção de água.

Utilizou-se uma balança digital com resolução de 0,01 g e uma estufa com controle de temperatura ajustável a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo os ensaios feitos seguindo as recomendações da ABNT NBR 15270-2:2017.

Para determinar a massa seca, os elementos cerâmicos foram submetidos à secagem em estufa por 24 horas, sendo pesados imediatamente após a remoção. Feito isso, foram realizadas duas pesagens consecutivas com intervalo mínimo de uma hora. Como os resultados não divergiram em mais de 0,25%, considerou-se que os blocos estavam totalmente secos, sendo essa considerada a massa seca.

Em seguida, os blocos foram submersos novamente em água à temperatura ambiente durante 24 horas, como mostra a Figura 26, e ao serem retirados, eles foram pesados sem o excesso de água, sendo essa considerada a massa úmida.

Figura 26: Secagem dos blocos em estufa, pesagem e submersão por 24 horas.



Fonte: Próprio autor

O cálculo do índice de absorção de água foi determinado a partir da relação entre a massa úmida e a massa seca do mesmo, como descrito pela Equação 11, sendo os valores médios apresentados na Tabela 12.

$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} * 100 \quad (11)$$

Em que:

AA : índice de absorção de água (em %);

M_u : massa úmida do corpo de prova (em g);

M_s : é a massa seca do corpo de prova (em g).

Tabela 11: Massa Seca, Massa úmida e Índice de Absorção

	BLOCO			MEIO BLOCO		
	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Índice de Absorção (%)	Massa Seca (g)	Massa Úmida (g)	Índice de Absorção (%)
Média	5440,25	6136,19	11,34	2903,82	3323,06	12,62
DP	50,681	79,98	0,55	20,74	24,35	0,52
CV (%)	0,86	1,33	3,98	0,90	0,68	3,19

Fonte: Próprio autor

Para o índice de absorção de água dos blocos cerâmicos estruturais de parede vazada, segundo a ABNT NBR 15270-1 (2017), os valores devem estar entre 8,0 % e 21,0 %, sendo que todas as unidades atenderam a esses limites.

3.1.3 Propriedades mecânicas

Assim como as demais propriedades, para a determinação das características mecânicas das unidades cerâmicas, seguiu-se as recomendações da ABNT NBR 15270-2:2017. Nos ensaios de resistência à compressão, foi necessário o capeamento das faces superior e inferior dos blocos e meio-blocos com placas de forro mineral. Essas placas de forro com fibra mineral são as mesmas utilizadas em outros trabalhos experimentais no Laboratório de Estruturas como em Dupim (2019), Fernandes Neto (2020), mostrando-se bastante eficiente e adequadas para a obtenção das propriedades mecânicas, evitando a concentração de tensões nas superfícies dos blocos em decorrência da conformação irregular ou presença de agregados.

Para o ensaio de compressão, realizado nos blocos e meio blocos, foi utilizada a máquina hidráulica elétrica para ensaios de compressão, ELE Internacional, Autotest 2000 da Inglaterra, com capacidade 2000 kN, e aplicação de controle de deslocamentos a uma velocidade de 0,02 mm/s. A resistência característica à compressão das unidades foi calculada conforme o item 5.7 da ABNT NBR 15270-1:2017, a partir da resistência à compressão estimada e ponderação devido ao número de corpos de prova ensaiados. Os valores médios característicos da resistência à compressão dos blocos são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Resistência Característica à Compressão

	BLOCO			MEIO BLOCO		
	Força (kN)	Resistência na A_{Bruta} (MPa)	Resistência na A_{liq} (MPa)	Força (kN)	Resistência na A_{Bruta} (MPa)	Resistência na A_{liq} (MPa)
Média	314,45	7,70	21,03	136,29	6,88	16,89
DP	46,21	1,11	2,65	23,12	1,17	2,34
CV (%)	14,70	14,45	12,60	16,96	17,06	13,87
f_{bk}	-	6,45	17,62	-	5,57	14,47

Fonte: Próprio autor

Por se tratar de um material de comportamento frágil, a ruptura dos corpos de prova se deu maneira brusca e explosiva, podendo ser observado pelas fissuras associadas ao confinamento do material e o estilhaçamento de alguns pedaços de cerâmica, como pode ser visto na Figura 27.

Figura 27: Ruptura dos blocos de alvenaria estrutural



Fonte: Próprio autor

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO E DE REVESTIMENTO

Seguindo a mesma linha dos trabalhos anteriores feitos no Departamento de Estruturas da EESC, para as argamassas de assentamento e revestimento aplicadas, utilizou-se cimento Portland composto CP II-E classe 32 da Holcim Cimentos, cal hidratada CH III da Itaú e Gesso em pó para revestimento da SM Gesso.

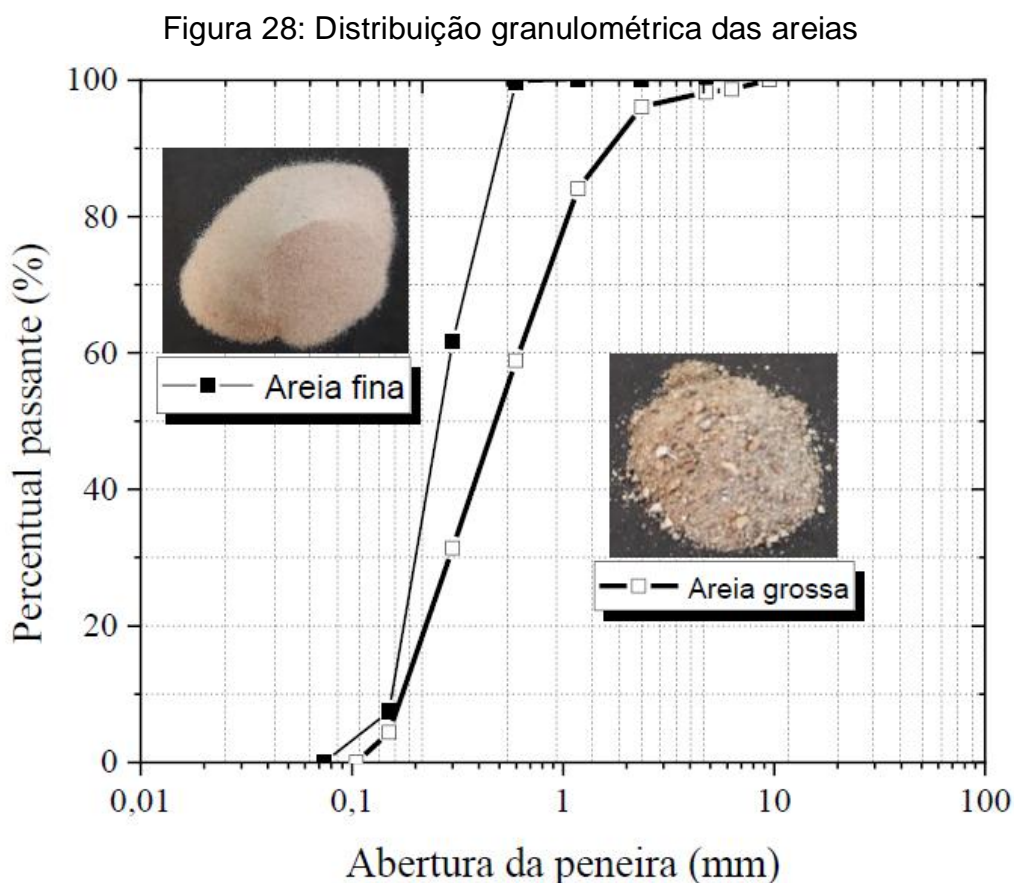
Para um melhor controle de qualidade dos materiais, a partir dos traços em massa, foram realizados os ensaios de massas específica e unitária para ambos os materiais. Para encontrar a massa específica utilizou-se os critérios da ABNT NBR 16605:2017: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Já a massa unitária foi determinada de acordo com a ABNT NBR NM 45:2006: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para essas propriedades.

Tabela 13: Propriedades físicas dos aglomerantes

Propriedade	Cimento CP II-E	Cal CH III	Gesso em pó
Massa específica (kg/m ³)	2960,0	2450,0	2600,0
Massa unitária (kg/m ³)	1155,0	765,0	610,0

Fonte: Próprio Autor

Os agregados miúdos utilizados na composição da argamassa de assentamento apresentaram granulometria diferente dos utilizados nas argamassas de revestimento, que eram de grãos mais finos. As propriedades físicas foram determinadas por meio da massa específica e da massa unitária. Foram seguidas as recomendações da ABNT NBR NM 52:2009: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente e ABNT NBR NM 45:2006. Com ajuda dos demais colegas do departamento que utilizaram os mesmos materiais, foi possível a determinação da granulometria seguindo a ABNT NBR NM 248:2003: Agregados – Determinação da composição granulométrica, através das curvas apresentadas na Figura 28, e pela determinação da dimensão máxima do agregado, conforme apresentado na Tabela 14.



Fonte: Fernandes Neto (2020)

Tabela 14: Propriedades físicas dos agregados

Propriedade	Areia fina	Areia grossa
Massa específica (kg/m ³)	2580,0	2570,0
Massa unitária (kg/m ³)	1560,0	1500,0
Dimensão máxima característica (mm)	0,60	2,36
Módulo de finura	1,30	2,30

Fonte: Fernandes Neto (2020)

Quanto à argamassa, optou-se por um traço tabelado, conforme a Norma Britânica BS 5628 – 1: 2005 para uma resistência que fosse usualmente utilizada em construções Brasileiras. O traço adotado foi de 1:0,5:4,5 em volume. Para a caracterização da argamassa de assentamento, foi realizado o ensaio de Índice de Consistência em seu estado fresco, conforme a ABNT NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência, e o ensaio de Resistência à Compressão para o estado endurecido.

O preparo da argamassa foi realizado com o auxílio de um misturador mecânico de eixo vertical, de acordo com o recomendado pela ABNT NBR 15812-2:2010. A mistura da argamassa foi realizada conforme prescrito pela ABNT NBR 16541:2016: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e realização dos ensaios, que indica um índice de consistência igual a $260 \pm 5,0$ mm. Para a determinação do índice de consistência utilizou-se uma mesa para ensaio de consistência, um molde tronco cônico, um soquete e uma régua metálica com resolução de 1,0 mm. Para que se chegasse à consistência exigida por norma foi necessário uma relação de água cimento de 1,48, resultando em um índice de 261,1 mm, a partir da média de três aferições realizados em diferentes pontos da mistura. Todas as pequenas paredes e os prismas foram confeccionados com argamassa de traço 1:0,5:4,5 em volume, e relação água/cimento de 1,48.

Para o ensaio de determinação da resistência à compressão, a ABNT NBR 13279:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração da flexão e à compressão, recomenda moldes prismáticos de 4,0 x 4,0 x 16,0 cm para os corpos de prova

de argamassa. Devido à baixa disponibilidade desses moldes no Laboratório de Estruturas, utilizaram-se moldes cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

A ABNT NBR 7215:2019: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, indica que os moldes devem ser untados na superfície interna com desmoldante, e preenchidos em quatro camadas aproximadamente iguais, cada uma recebendo 30 golpes uniformes e distribuídos com o soquete manual, sendo que esse processo foi seguido para a montagem de todos os 6 corpos de prova de argamassa de assentamento. Após a moldagem, permaneceram em câmara úmida até serem retificados para a realização dos ensaios de resistência à compressão, que aconteceram com idade de 28 dias. Assim como os blocos, os corpos de prova foram rompidos com o auxílio da máquina hidráulica elétrica para ensaios de compressão, ELE Internacional, Autotest 2000 da Inglaterra, com capacidade 2000 kN, e aplicação de controle de deslocamentos a uma velocidade de 0,01 mm/s. Na Figura 29, é possível visualizar o corpo de prova depois de rompido, e na Tabela 15, os dados médios encontrados.

Figura 29: Corpo de prova de argamassa de assentamento rompido à compressão



Fonte: Próprio autor

Tabela 15: Propriedades mecânicas da argamassa de assentamento

	Força (kN)	f_a (MPa)
Média	8,36	4,26
DP	1,37	0,75
CV (%)	16,43	16,43

Fonte: Próprio autor

Para a escolha das argamassas de revestimento, pensou-se inicialmente em quantos corpos de prova seriam possíveis de serem colocados dentro do forno e na quantidade de fornadas que seriam realizadas, devido ao tempo e os recursos disponíveis. Diante disso, determinou-se que seria possível escolher sete tipos de revestimentos. Optou-se primeiro por testar a argamassa que é utilizada em grande escala nas edificações, que é a argamassa convencional de cimento, cal e a areia com um traço bastante consolidado e que está apresentado na tabela de resistência ao fogo para alvenaria no anexo B da IT 08:2019, como o emboço na proporção de 1:2:9 em volume.

Para as demais escolhas, pensou-se em testar argamassas com materiais que tivessem grande potencial para serem isolantes térmicos frente às suas características. Escolheu-se a argamassa com fibra de polipropileno, onde seriam utilizados 2 kg de fibra para cada metro cúbico de argamassa, a argamassa com incorporador de ar com o traço de 1:9 em volume, com 0,2% do aditivo para cada kg de cimento. Conforme Ciriades (2018) quando o concreto apresenta poros em seu interior as tensões de vapor são reduzidas e o fenômeno de *spalling* diminui. Sabendo-se desse fato e observando-se que esse fenômeno tinha sido recorrente em outras pesquisas anteriores no Departamento, como pode ser visto em Dupim (2019) e Fernandes Neto (2020), resolveu-se testar revestimentos com argamassa que tivessem esse comportamento mais poroso, como é o caso da argamassa com adição de fibras que se fundem entre 150°C e 175°C formando poros e a argamassa com incorporador de ar que possui a propriedade de deixar o material também mais poroso.

Outra opção escolhida foi a argamassa de gesso na proporção (em volume) de 1:1 e a argamassa de gesso com vermiculita, também em volume na

proporção de 1:1. A escolha se deu devido ao fato do gesso e da vermiculita serem materiais mais sustentáveis, já que hoje se tornou uma vantagem na construção civil a troca por opções que agredam menos o meio ambiente. Observa-se que eles também são agregados mais econômicos que a areia, essa informação baseia-se na região de São Carlos/SP, onde foi realizada a pesquisa. Trabalhos como o de John e Antunes (2002), Dolezelová et al. (2018) e Krejsová et al. (2018), destacam que argamassas são melhores que pastas de gesso, uma vez que a granulometria das partículas melhora o comportamento aderente por serem mais ásperas.

Para esses revestimentos argamassados à base de cimento, foram realizados o ensaio de Índice de Consistência no estado fresco e Resistência à compressão característica no estado endurecido. Já para aqueles à base de gesso foram realizados o ensaio de tempo de pega e o de resistência à compressão. Tanto os ensaios de Índice de Consistência e Resistência à compressão característica foram realizados conforme já mencionados para as argamassas de assentamento. Já para as argamassas em gesso, ao invés do índice de Consistência realizou-se o ensaio de início e fim de pega, utilizando o aparelho de Vicat, como ilustrado na Figura 30. O ensaio consiste em preparar a mistura de gesso conforme será aplicada, colocá-la no tronco de cone do aparelho de Vicat. O tempo de início de pega, se dá no instante que a agulha atingiu 1 mm da base da mistura; já o fim acontece quando essa mesma agulha não consegue mais penetrar sobre a mesma mistura. Seguem na Tabela 16 os resultados encontrados.

Figura 30: Ensaio se início e fim de pega da argamassa de gesso e areia



Fonte: Próprio autor

Tabela 16: Propriedade das argamassas de revestimento

Argamassas	Relação a/c	Resistência à Compressão (Mpa)	Índice de Consistência (mm)	Índice de Pega (min)	Fim de Pega (min)
Convencional	1,50	4,86	254,98	-	-
Com fibras de polipropileno	1,50	4,55	252,00	-	-
Com incorporador de ar	1,50	4,63	257,33	-	-
De gesso com areia	1,20	4,28	-	6:09	36:37
De gesso com vermiculita	1,20	3,90	-	5:55	22:45

Fonte: Próprio autor

Como ainda ficariam faltando dois tipos de revestimentos, optou-se por alternativas que não seriam fabricadas in-loco e sim industrializadas, precisando somente aplicar sobre a paredes. Então, escolheu-se pela fixação de placas de gesso, Drywall - Chapa gesso RF 1,20x1,80x12,5, em parte dos corpos de provas e no restante a aplicação de tinta intumescente - Skywall 636 -

Intumescente para Alvenaria. Esses revestimentos não serão ensaiados, considerando-se válidas as informações fornecidas pelo fabricante.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE ALVENARIA ESTRUTURAL

Como parte das etapas do programa experimental deste trabalho, realizou-se a caracterização dos elementos de alvenaria estrutural em temperatura ambiente para avaliação do seu comportamento mecânico. Para isso, foram ensaiados à compressão, prismas de dois blocos com 29 x 39 cm, e pequenas paredes de cinco fiadas com 59 x 99 cm executadas utilizando os blocos e a argamassa já especificados anteriormente, tendo sido utilizado o processo de argamassamento total, com 10 mm de espessura. Os corpos de prova podem ser vistos à esquerda na Figura 31.

Para a realização da segunda e da terceira etapas foi necessária a produção dos prismas e das pequenas paredes, confeccionadas da mesma forma e com os mesmos materiais que os corpos de prova que seriam ensaiados a temperatura ambiente, porém agora revestidas, garantindo-se uma boa aderência entre o bloco cerâmico e o revestimento, como ilustrado mais à direita na Figura 31 a seguir. De acordo com o operário essa aderência poderia ser garantida com as faces das paredes e prismas úmidos antes da aplicação, e assim prosseguiu.

Figura 31: Corpos de provas confeccionados para os ensaios



Fonte: Próprio Autor

Um único pedreiro foi responsável pela execução de todas as paredes e prismas. Para que se conseguisse uma melhor uniformidade e qualidade dos corpos de prova, verificou-se o nível e o prumo durante todo o processo de construção. Com todos os corpos de prova prontos e decorridos mais de 28 dias, realizou-se a caracterização em temperatura ambiente. Como exigido em norma, foram ensaiados 6 prismas e 3 pequenas paredes.

Para o ensaio de caracterização dos prismas e pequenas paredes, seguiu-se a ABNT NBR 15812-3:2010, sendo realizado na máquina Instron Satec®, modelo 300 HVL e capacidade nominal de 1500 kN, e em uma máquina Instron universal, modelo 8506 e capacidade nominal de 2500 kN, que se encontram no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE – EESC). Para o rompimento, foi utilizado o controle de deslocamentos a uma velocidade de 0,02 mm/s, sendo que as faces superior e inferior forem regularizadas com placas de forro de fibra mineral, assim como nos blocos.

Como pode ser visto na Figura 32, o modo de ruptura dos prismas se deu principalmente pela compressão da argamassa em estado triaxial de tensões, levando ao fedilhamento do bloco. Isso ocorre devido à argamassa possuir menor resistência que o bloco, provocando maiores deformações, que se tornam responsáveis pela expansão lateral da junta, ocasionando o surgimento de tensões de tração em alguns pontos dos blocos próximos à interface, como explica Mohamad (1998), ficando visíveis então as fissuras.

Figura 32: Modo de Ruptura dos prismas



Fonte: Próprio Autor

Já nas pequenas paredes é possível visualizar as fissuras principalmente na vertical, nas suas regiões centrais, observando-se o aparecimento das fissuras na horizontal na região da argamassa da última fiada, como pode ser visto na Figura 33.

Figura 33: Modo de Ruptura das pequenas paredes



Fonte: Próprio Autor

Os resultados serão apresentados no Capítulo 5, para a devida comparação com as resistências residuais.

4 ORGANIZAÇÃO DO ENSAIO

Na terceira etapa do programa experimental, que consiste nos ensaios para a simulação do incêndio-padrão, conforme a curva proposta pela ISO 834-1:1999, foi avaliado o comportamento térmico dos prismas e das pequenas paredes de alvenaria estrutural, por meio de dois ensaios realizados no forno horizontal que se encontra no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE – EESC), conforme a Figura 1. O equipamento utilizado apresenta funcionamento com gás natural, possuindo dimensões de 3,0 x 4,0 x 1,5 m e dispõe de oito queimadores que são acionados através de uma central de comando, com evolução da temperatura controlada por nove termopares principais que são posicionados internamente no equipamento durante o ensaio. A confecção dos corpos de prova para essa etapa foi descrita no capítulo anterior, na seção 3.3

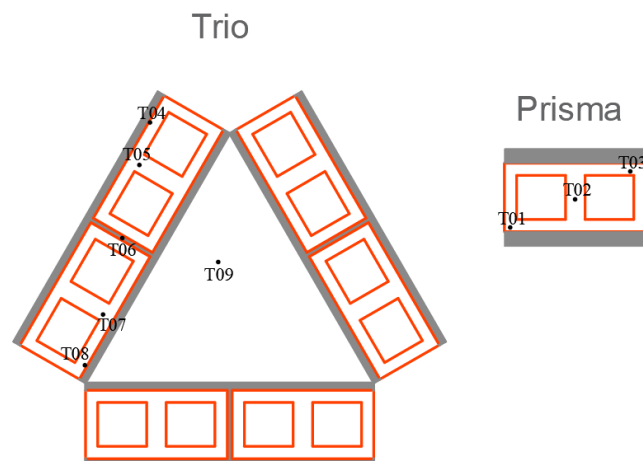
4.1 INSTRUMENTAÇÃO

Para a execução dos ensaios com elevação de temperatura, foram necessárias algumas providências para que os resultados fossem satisfatórios. Neste capítulo elas serão apresentadas em detalhe. Para a captação da variação de temperatura dentro do forno, foram utilizados termopares do tipo K, isolados com fibra de vidro, com temperatura máxima nominal de 1250 °C e diâmetro de 2,5 mm, sendo que eles possuem dois cabos individuais, um positivo e outro negativo. Os cabos termopares foram instalados ao longo da seção transversal do elemento, sendo distribuídos 3 em um prisma de cada conjunto e 6 no trio de pequenas paredes, conforme a Figura 34 e 35, possibilitando a obtenção das curvas tempo x temperatura em diferentes pontos.

A quantidade dos termopares foi dimensionada em função das entradas que estavam funcionando no sistema de aquisição; como eram 4 conjuntos por fornadas e havia 38 entradas, optou-se por 36 no total, distribuindo-se 9 por conjunto, como detalhado acima. O ideal seria que cada dois termopares estivessem posicionados em pontos diferentes, para que pudessem medir a mesma faixa de temperatura; porém devido à quantidade disponível isso não foi

possível, entendendo-se que a melhor forma seria então buscar um maior número de pontos diferentes para que se pudessem medir várias camadas da parede revestida, objetivando a produção de resultados para pesquisas numéricas futuras.

Figura 34: Disposição dos termopares em cada conjunto de revestimento.



Fonte: Próprio Autor

As Figuras 35 e 36 apresentam como as paredes foram instrumentadas, observando-se que os termopares foram instalados na parte superior da parede, com um furo de uns 5 cm no bloco, em que foi colocado o termopar e preenchido com argila. Esse processo pode ser encontrado também em Fernandes Neto (2020), que testou algumas formas alternativas e concluiu que essa foi a que produziu resultados mais satisfatórios.

Figura 35: Detalhamento do termopar instalado na parte superior da pequena parede revestida.



Fonte: Próprio Autor

Figura 36: Termopares instalados ao longo da pequena parede revestida

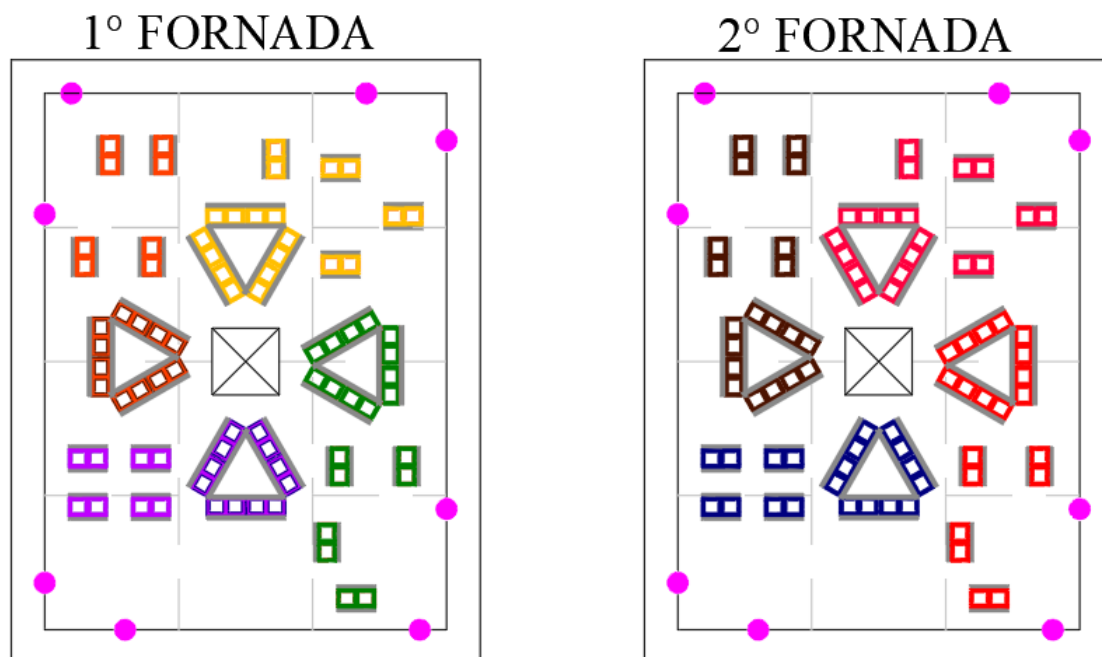


Fonte: Próprio Autor

4.2 SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO-PADRÃO

Os corpos de provas foram instrumentados com termopares capazes de suportar até 1250°C, levados ao forno de tal forma que as pequenas paredes, em trio, formassem um compartimento interno fechado com os prismas dispostos nos espaços livres entre os trios. Na tentativa de simular o que acontece no ambiente do incêndio, todos os corpos de prova foram cobertos por manta cerâmica e somente as faces maiores dos corpos de provas recebiam a ação do fogo. Os prismas recebiam fogo nas duas faces e as pequenas paredes recebiam somente na face externa, uma vez que a parte superior estava vedada com manta. Foram realizadas 2 fornadas, com os corpos de prova foram dispostos dentro do forno, conforme a Figura 37.

Figura 37: Disposição dos corpos de prova dentro do forno



Legenda:

- Argamassa tradicional com cimento, cal e areia, com traço
- Argamassa à base de cimento com fibras de polipropileno
- Argamassa à base de cimento com adição de aditivo incorporador de ar
- Sem revestimento
- Pintura Especial
- Argamassa com gesso e areia
- Placas de gesso corta-fogo
- Argamassa de gesso e vermiculita;
- Posição dos queimadores

Fonte: Próprio Autor

Como mostrado na figura 37, cada fornada continha quatro conjuntos, sendo cada um com um revestimento diferente e constituído por quatro prismas e três pequenas paredes (formando um triângulo). Na primeira fornada foram ensaiados os grupos de paredes e prismas sem revestimento, com argamassa tradicional, argamassa de cimento com fibras de polipropileno e argamassa de cimento com adição de incorporador de ar. Já na segunda fornada foram ensaiados os grupos de paredes e prismas com: revestimento de argamassa de gesso, argamassa de gesso com adição de vermiculita, pintura intumescente e

Drywall com resistência ao fogo. A Figura 38 apresenta a disposição dos corpos de prova dentro do forno, sendo à esquerda a primeira fornada e à direita a segunda.

Figura 38: Disposição dos corpos de prova dentro do forno à esquerda a foto dos grupos da primeira fornada. À direita a foto dos grupos da segunda fornada.



Fonte: Próprio Autor

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A etapa final consiste nas análises dos resultados obtidos a partir do rompimento das pequenas paredes e prismas sem revestimento, em temperatura ambiente, comparando-os com os prismas e pequenas paredes, com e sem revestimentos, submetidos à curva de incêndio-padrão. Adicionalmente analisa-se e evolução de temperatura nos termopares.

5.1 DESEMPENHO MECÂNICO DOS ELEMENTOS

Após 2 horas de ensaio, os corpos de prova receberam um resfriamento de forma rápida, no qual os queimadores do forno foram desligados e acionou-se o sistema de ventilação por aproximadamente 6 horas. Depois disso os ventiladores foram desligados, mas o forno ainda permaneceu todo fechado, até atingir as 24 horas do ensaio, momento em que a temperatura retornou para aproximadamente 70°C. Com isso fica permitida a abertura da tampa; por segurança espera-se mais 24 horas para que a temperatura chegue aos 30°C para acessar o forno, e proceder com a inspeção visual. Nessa inspeção constatou-se que os prismas possuíam um nível de degradação maior, o que é notável pelo fato deles terem recebido fogo nas duas faces. Já as pequenas paredes, por estarem em trios, como se estivessem compartimentadas, estavam mais íntegras, tanto que todas elas puderam ser verificadas quanto à resistência residual, o que não aconteceu com os prismas. Terminado todo esse processo, as paredes e os prismas foram levados até a prensa INSTRON, que se encontra no Laboratório de Estruturas (LE/EESC) para serem rompidas por compressão e verificada a sua resistência residual, ou seja, resistência remanescente após a submissão a altas temperaturas. A seguir, nas Figuras 39 a 46, será apresentado o aspecto visual de cada conjunto, antes e depois do ensaio de resistência residual à compressão.

Ao se fazer uma inspeção visual no grupo que foi ensaiado na primeira fornada, destacam-se na Figura 39, as pequenas paredes e os prismas sem revestimento. Nesses corpos de prova a argamassa de assentamento tende a se deformar mais que os blocos, induzindo tensões de tração nos blocos, tornando

então evidentes as fissuras na região central, como pode-se perceber pelas imagens apresentadas. Os prismas desse conjunto apresentavam fissuras mais evidentes no encontro entre os septos e as paredes externas, como pode ser visto na Figura 39 na imagem ao centro, pois nessa região ocorrem as maiores concentrações das tensões térmicas e a dilatação diferencial que ocasionam tensões de tração na direção horizontal, como explica Nguyen e Meftah (2012). Dos quatro prismas que foram ensaiados a altas temperaturas, três deles puderam ser ensaiados para a aferição da resistência residual à compressão; todos eles estavam com a argamassa bastante danificada, sendo que um deles ao ser retirado do forno teve os blocos separados.

Figura 39: CONJUNTO SEM REVESTIMENTO - À esquerda a pequena parede ao ser resfriada. No meio o prisma ao sair do forno. À direita a parede depois do ensaio de resistência residual



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 40, em que se vê a parede revestida de argamassa tradicional, percebe-se que em 120 minutos, o revestimento não se soltou totalmente, sendo suficiente para que as fissuras praticamente se tornassem imperceptíveis em comparação com as paredes e prismas não revestidos. Quanto aos prismas, por receberem fogo nas duas faces, os seus revestimentos se soltaram e, assim como o não revestido, a argamassa de assentamento estava bastante

degradada, sendo possível ensaiar apenas três dos quatro corpos de prova. Dos três que foram levados à prensa, todos apresentavam a argamassa bastante pulverulenta, evidenciando a grande perda de água.

Figura 40: CONJUNTO COM ARGAMASSA TRADICIONAL: À esquerda o aspecto ao ser resfriado sem a retirada do revestimento, à direita depois de retirado o revestimento para visualização das fissuras



Fonte: Próprio Autor

Já o grupo das paredes revestidas com argamassa com adição de incorporador de ar (Figura 41), o revestimento perdeu a aderência, mas ainda foi capaz de proteger para que as fissuras diminuíssem em relação às paredes e prismas não revestidos. Entretanto, isso não foi suficiente para garantir uma resistência residual maior, em comparação com a argamassa tradicional, como será mostrado na Tabela 18. Nesse conjunto, foi possível ensaiar os quatro prismas, pois como pode se perceber na Figura 41 ao meio, o revestimento, por mais que tenha perdido a aderência, permaneceu parcialmente em frente ao bloco protegendo e impedindo a total degradação da argamassa; mas, ao serem retiradas as mantas laterais, esse revestimento virou pó. Como para a argamassa tradicional, não foi possível ensaiar os quatro corpos de prova, este foi o único conjunto em que o comportamento dos prismas não seguiu o dos trios. A resistência do conjunto de prismas de argamassa com incorporador de

ar acabou ficando maior que das pequenas paredes, como pode ser visto na tabela 17.

Figura 41: CONJUNTO DE ARGAMASSA COM INCORPORADOR DE AR: À esquerda a pequena parede ao ser resfriada. No meio o prisma sem a aderência do revestimento. À direita com poucas fissuras após os 120min



Fonte: Próprio Autor

Terminando a análise da primeira fornada, as paredes revestidas com argamassa de cimento e adição de fibras, por estarem compartimentadas, não aparentavam grandes alterações, como se pode ver na Figura 42 à esquerda. Porém, ao serem retiradas as mantas que estavam sobre o grupo e na sua lateral, dificultando a entrada do ar quente, percebeu-se que os blocos já tinham sinais de ruptura como se vê na Figura 42 à direita. Analisando-se os prismas, em um primeiro momento parecia que eles possuíam os mesmos comportamentos que as paredes compartimentadas, que era o revestimento quase intacto; no entanto, ao se retirarem as mantas laterais, notou-se algo diferente, como pode ser visto nas Figura 43 abaixo; todos os prismas estavam com os blocos rompidos na parede lateral, em região central. Acredita-se que os revestimentos nas duas faces podem ter acrescentado tensões térmicas de tração, o que teria influenciado no aparecimento de fissuras nos blocos. Não se conseguiu nenhum prisma íntegro para ensaio da resistência residual.

Figura 42: CONJUNTO DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPIPILENO: À esquerda o lado que estava interno ao trio. As outras duas, a pequena parede depois de ensaiado quanto à resistência residual à compressão



Fonte: Próprio Autor

Figura 43: Prisma com argamassa com adição de fibra de polipropileno após o resfriamento.



Fonte: Próprio Autor

Analisando-se a segunda fornada, as paredes que estavam com revestimento de Drywall (Figura 44), apresentaram placas bastante danificadas. No entanto, como pode ser visto na tabela 18, o revestimento protegeu bastante o conjunto, preservando uma ótima resistência residual, que chegou a ser superior à resistência das paredes que estavam em temperatura ambiente, reduzindo de forma expressiva o aparecimento de fissuras. A tinta intumescente, que foi escolhida por ser indicada como um revestimento eficiente para proteção ao fogo, foi a que levou aos piores resultados dentre todos os grupos, com o aparecimento de muitas fissuras, como pode ser visto na Figura 45, e a menor resistência residual. Acredita-se que, por mais que o fabricante tenha indicado que essa tinta poderia ser usada para a finalização da parede, os ensaios indicam a eventual necessidade de utilização de acabamento adicional, para a melhoria dos resultados.

Figura 44: CONJUNTO COM DRAWALL RESISTENTE AO FOGO: 1° - Prisma depois de resfriado. 2° - Parede ao ser retirada do forno, depois do resfriamento. 3°- Parede depois de rompida para verificação da resistência residual



Fonte: Próprio Autor

Figura 45: CONJUNTO COM TINTA INTUMESCENTE: À esquerda o prisma depois de rompido para verificação da resistência residual. Ao meio a parede ao ser retirada do forno, depois do resfriamento. À Direita a parede depois de rompida para verificação da resistência residual



Fonte: Próprio Autor

Figura 46: CONJUNTO DE ARGAMASSA DE GESSO COM VERMICULITA: À esquerda o prisma depois de rompido para verificação da resistência residual. Ao meio a parede ao ser retirada do forno, depois do resfriamento. À Direita a parede depois de rompida para verificação da resistência residual



Fonte: Próprio Autor

Figura 47: CONJUNTO DE ARGAMASSA DE GESSO E AREIA: À esquerda parede ao ser retirada do forno, depois do resfriamento. À Direita a parede depois de rompida para verificação da resistência residual



Fonte: Próprio Autor

As paredes com argamassa de gesso (Figura 46 e 47) produziram resultados bem diferentes umas das outras, o que não se esperava. A que tinha adição de vermiculita (Figura 46), por esse ser um material que expande ao entrar em contato com altas temperaturas ficando poroso, permitiu que as tensões se dissipassem, fazendo com que a resistência residual também se mantivesse como um excelente resultado. Já a argamassa de gesso com areia (Figura 47) teve o revestimento deslocado, favorecendo o aparecimento de fissuras e fazendo com que a resistência residual ficasse abaixo do esperado, presume-se que seja pela espessura do revestimento ser de 0,5 cm, muito pequena em relação aos demais.

Nos ensaios de compressão foi utilizada uma velocidade de 0,02mm/s para que o rompimento das paredes acontecesse de forma gradual. Nas tabelas 17 e 18 apresentam-se os resultados de: carga máxima média, tensão média e porcentagem da tensão residual em relação ao conjunto ensaiado em condições ambientes, para os prismas e as pequenas paredes, respectivamente.

Tabela 17: Dados da resistência residual do grupo de prismas

	Carga Máxima Média (kN)	DP	CV (%)	Tensão Média (MPa)	Porcentagem %
Ambiente	163,63	10,45	6,39	4,03	-
Sem Revestimento	42,23	14,46	34,25	1,04	25,80
Incorporador	91,73	28,85	31,45	2,26	56,06
Tradicional	69,63	12,57	18,06	1,71	42,55
Fibra	0,00	-	-	0,00	0,00
Gesso e Vermiculita	43,20	8,56	19,83	1,06	26,40
Gesso e Areia	66,38	15,13	22,80	1,63	40,56
Tinta Intumescente	33,13	5,20	15,71	0,82	20,24
Drywall	79,73	17,96	22,53	1,96	48,72

Fonte: Próprio Autor

Tabela 18: Dados da Resistência Residual do grupo de pequenas paredes

	Carga Máxima Média (kN)	DP	CV (%)	Tensão Média (MPa)	Porcentagem %
Ambiente	267,35	66,14	24,74	3,24	-
Sem Revestimento	137,70	26,62	19,33	1,67	51,50
Incorporador	214,90	20,33	9,46	2,60	80,38
Tradicional	242,83	37,90	15,61	2,94	90,83
Fibra	113,15	23,45	20,72	1,37	42,32
Gesso e Vermiculita	292,39	76,20	26,06	3,54	109,37
Gesso e Areia	119,87	42,42	35,39	1,45	44,84
Tinta Intumescente	124,27	46,56	37,47	1,50	46,48
Drywall	289,30	77,40	26,75	3,50	108,21

Fonte: Próprio Autor

Quando analisamos de forma separada os prismas e as pequenas paredes, percebe-se que alguns grupos seguem comportamentos similares,

sendo que a porcentagem residual dos prismas é aproximadamente a metade da porcentagem das pequenas paredes. Alguns dos grupos fogem do comportamento esperado, supõe que seja porque os prismas ficaram mais próximos dos queimadores, o que influencia bastante, já que a chama está diretamente aplicada sobre a face dos prismas, fazendo com que certos corpos de prova fossem perdidos, antes mesmo de chegarem à prensa. Como é o caso, principalmente, dos prismas com revestimento de adição de Fibra de Polipropileno ao cimento, em que todos foram perdidos, não sendo possível avaliar a sua resistência residual. Outra questão que faz com que esse resultado também tenha influência é o fato de as pequenas paredes estarem dispostas em trios recebendo chama somente em uma das faces, uma vez que estavam simulando um ambiente compartimentado, mesmo que de forma simplificada, diferentemente dos prismas em que todos estavam dispostos individualmente dentro do forno.

Ao se analisar o grupo de paredes sem revestimentos, percebe-se que elas ainda apresentavam mais da metade da resistência que possuíam antes de serem submetidas a uma situação de altas temperaturas. Os grupos de paredes em que foram aplicadas argamassa de cimento com adição de fibras, argamassa de gesso e tinta intumescente apresentaram os piores resultados na análise da resistência residual, como visto nas tabelas anteriores, sendo que não foi possível chegar nem aos 50%. As de cimento com adição de fibras de polipropileno, está ligado ao fato de estarem rompidas em algumas regiões das paredes, pelo aumento das tensões térmicas provadas internamente aos blocos. Já as com revestimento de argamassa de gesso e de tinta intumescente, possuíam espessura quase que depressível, fazendo com que o aumento de temperatura atingisse a argamassa de assentamento mais rapidamente.

Os conjuntos de argamassa tradicional, argamassa de gesso com adição de vermiculita e Drywall com proteção ao fogo produziram resultados melhores do que o esperado, pois tanto a argamassa de gesso, quanto o grupo revestido com Drywall, superaram as resistências encontradas no grupo de paredes que foram rompidas em temperatura ambiente. Como o número de paredes ainda é pequeno, acredita-se que para análise mais detalhada, sejam necessários outros

ensaios com maior quantidade de corpos de prova com os revestimentos de melhor desempenho.

5.2 DESEMPENHO TÉRMICO DOS ELEMENTOS

O comportamento térmico dos elementos estruturais em situação de incêndio foi realizado por meio das curvas tempo x temperatura, obtidas pelos diferentes pontos em que se encontravam termopares nos trios e prismas, possibilitando avaliar a evolução de temperatura e o fluxo de calor ao longo dos elementos observados. Como já mencionado, o ensaio seguiu a curva de incêndio-padrão proposta pela ISO 834-1:1999 apresentada na seção 2.1.1.3, com os corpos de prova submetidos à elevação de temperatura durante 120 minutos, sendo este o estipulado para o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) indicado pela ABNT NBR 14432:2001 e pela Instrução técnica IT 08:2019 para edificações residenciais com altura superior a 30 metros.

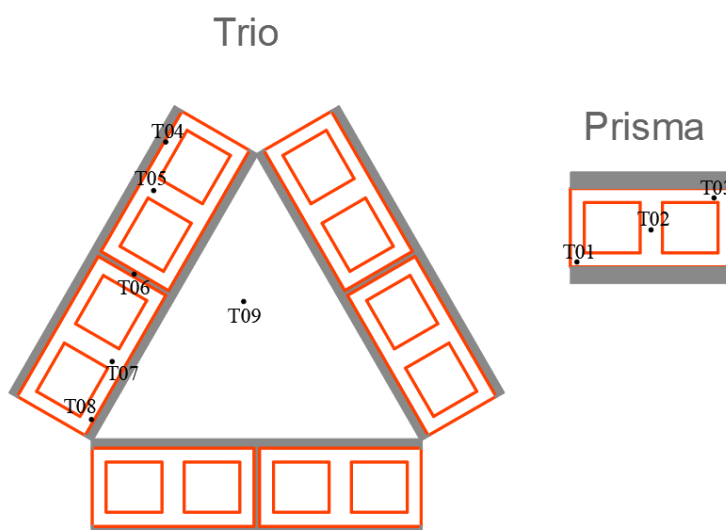
Apesar das intercorrências que ocorreram ao longo dos ensaios, que podem ser observadas em alguns gráficos de resultados, a elevação da temperatura interna do forno atendeu satisfatoriamente à curva de incêndio-padrão proposta pela ISO 834-1:1999. A seguir nas Figuras 48 a 55, serão apresentadas as curvas tempo x temperatura de cada conjunto utilizado na presente pesquisa.

Todos os conjuntos seguiram os mesmos padrões para que fosse possível fazer comparações, sendo que os números foram dispostos conforme a Figura 48 a seguir, com os termopares de 1 a 3, colocados nos prismas do conjunto, os termopares 4,5,7 e 8 colocados ao longo da seção transversal do bloco cerâmico – O 4 na parede externa que ficaria exposta ao fogo, junto ao revestimento, o 5 no septo interno ao bloco, mais próximo à parede que ficaria exposta, o 7 e 8, espelhados respectivamente porém na região interna ao bloco. O termopar 6 foi colocado na argamassa de assentamento central, na metade da seção transversal e por fim o termopar 9 que foi colocado no centro do trio, porém ele não foi fixado totalmente, tinha a manta pressionando-o para não se mover ao longo do ensaio.

Como se percebe, nem todos os gráficos contam com resultados de todos os termopares apresentados na Figura 48. Isso relaciona-se a problemas com o sistema de aquisição, que não permitiu a leitura da temperatura. Outro ponto a se mencionar é que alguns termopares começaram a registrar dados apenas a partir do meio do ensaio.

Em todos os gráficos será possível ver a curva Controle do processo, que representa a curva de incêndio padrão proposta pela ISO 834-1:1999, e a curva de controle média que é a representação de como se deu o aumento de temperatura do forno ao longo do ensaio.

Figura 48: Disposição dos termopares em cada conjunto de revestimento.



Fonte: Próprio Autor

Cada conjunto foi nomeado de forma a facilitar a identificação da seguinte forma:

Primeira fornada

- SR sem revestimento
- T tradicional
- I argamassa com incorporador de ar
- F argamassa com fibras de polipropileno

Segunda fornada

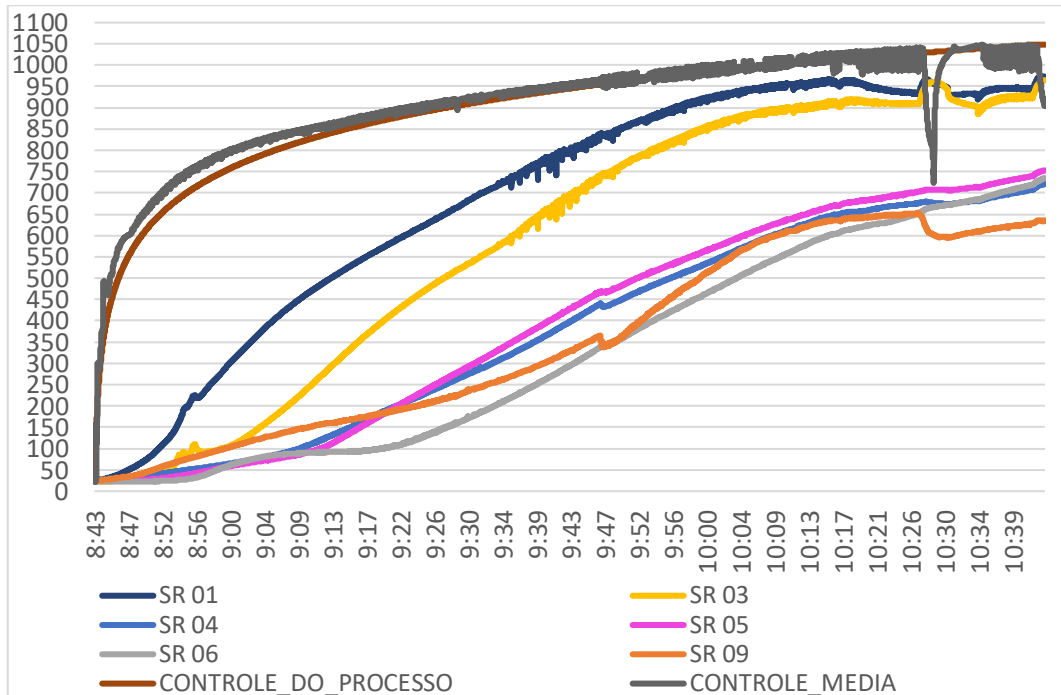
- D Drywall RF
- A argamassa de gesso com areia
- V argamassa de gesso com vermiculita
- TI tinta intumescente

Toda a análise será feita comparando os conjuntos entre si, e apresentando o tempo em que os grupos atingiram o 180°C em um único ponto, o que seria a temperatura máxima a ser atingida, de acordo com a ABNT NBR 14432:2001 e pela Instrução técnica IT 08:2019, quando a parede está submetida a elevação de temperatura em uma única face e com carregamento. No entanto, nessa pesquisa não foi aplicado carregamento, os prismas estão com fogo nas duas faces, e os trios foram compartimentados de maneira simplificada, fazendo com que indiretamente ocorra elevação de temperatura internamente também, portanto não será possível afirmar que tenha ou não atingido o tempo de requerimento ao fogo, apenas é possível a comparação de eficiência entre os conjuntos.

Ao se analisar o gráfico da Figura 49, que pertence ao grupo dos prismas (termopares 1 e 3) e paredes (termopares 4,5 6 e 9) sem revestimentos, percebe-se que nos 15 primeiros minutos os prismas já atingem 180°C. Já as pequenas paredes desse grupo foram atingir tal limite aos 30 min, o que ainda é baixo diante do necessário para a maioria dos casos práticos.

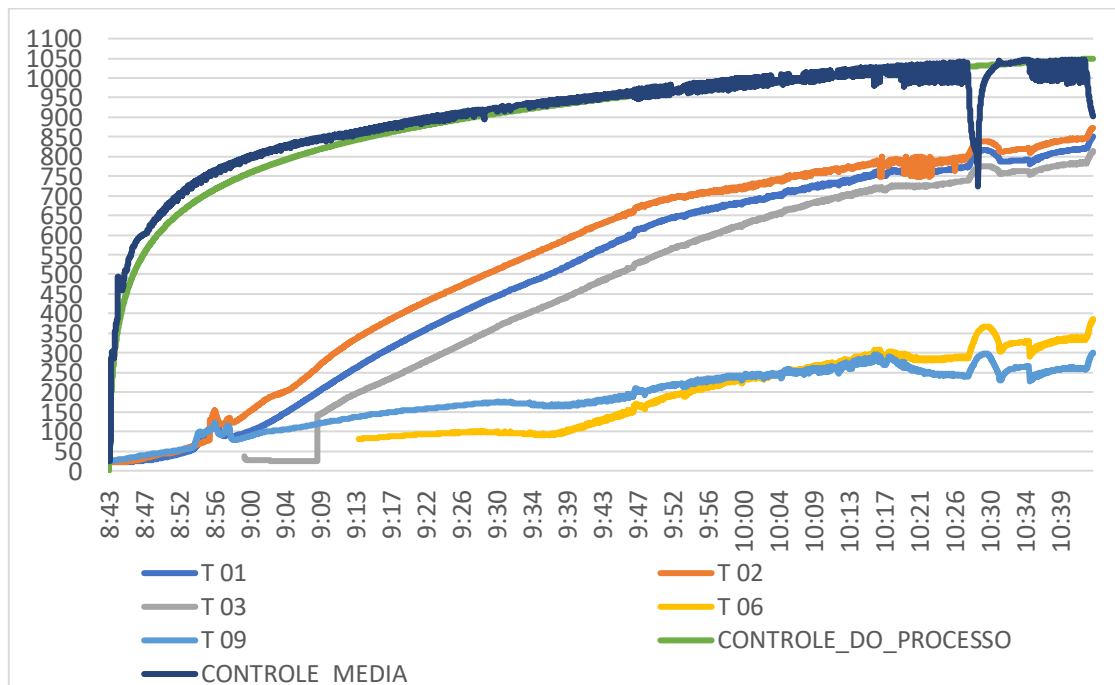
A curva SR 06, que representa o ponto da argamassa de assentamento bem ao centro da parede, aquece de maneira bem mais lenta que os demais pontos. Isso é evidente em quase todos os gráficos em que foi possível obter essa curva, com exceção do grupo com argamassa de fibra de polipropileno. Acredita-se que por ser a argamassa um material cimentício, a fixação do termopar é mais fácil, pois é possível abrir o furo e enchê-lo com argila por completo, o que é bastante difícil nos blocos cerâmicos. Outro ponto que não foi perdido em todos os conjuntos foi o de número 09. Na Figura 49, as temperaturas estão sistematicamente um pouco abaixo do que nos pontos nas pequenas paredes, o que comprova a importância da compartimentação dos ambientes, mesmo que seja 100% eficiente, e o quanto isso ajuda nos primeiros minutos do incêndio.

Figura 49: Curva Tempo X Temperatura – Grupo SEM REVESTIMENTO



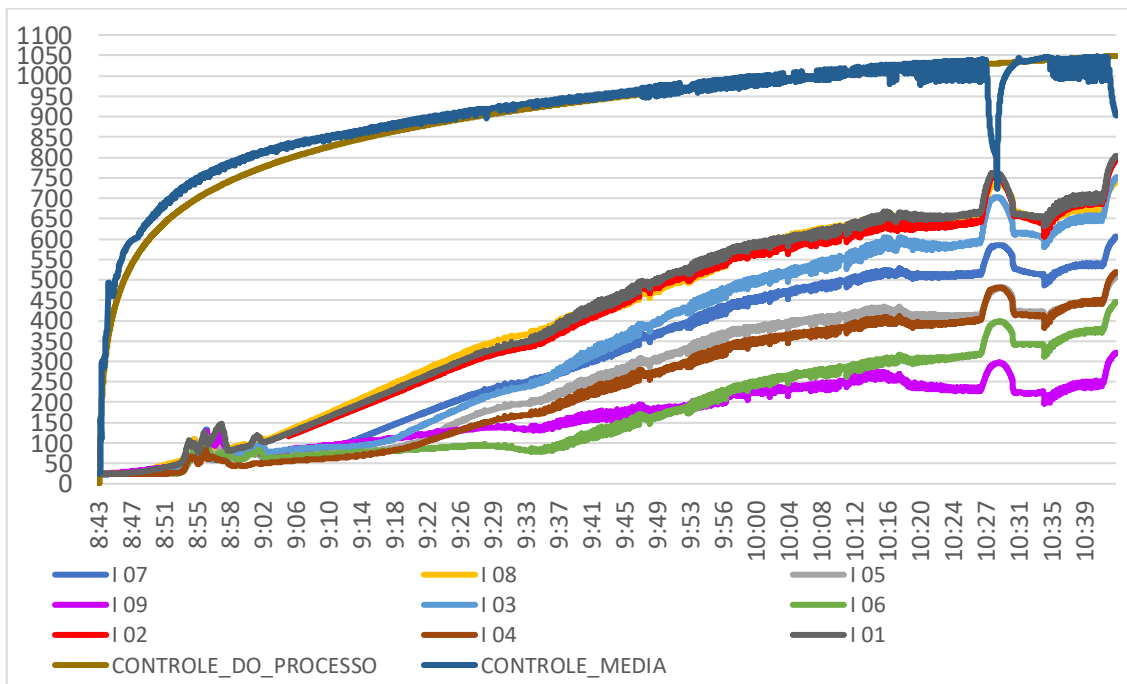
Fonte: Próprio Autor

Figura 50: Curva Tempo X Temperatura – Grupo AGARMASSA TRADICIONAL



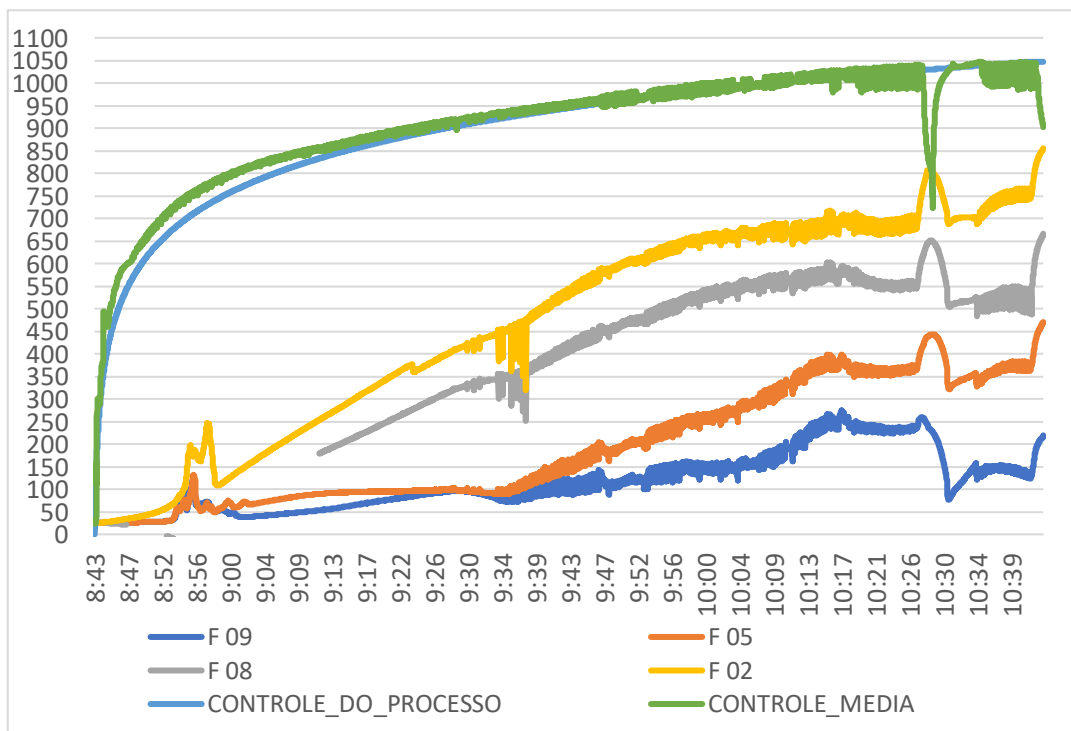
Fonte: Próprio Autor

Figura 51: Curva Tempo X Temperatura – Grupo COM INCORPORADOR DE AR



Fonte: Próprio Autor

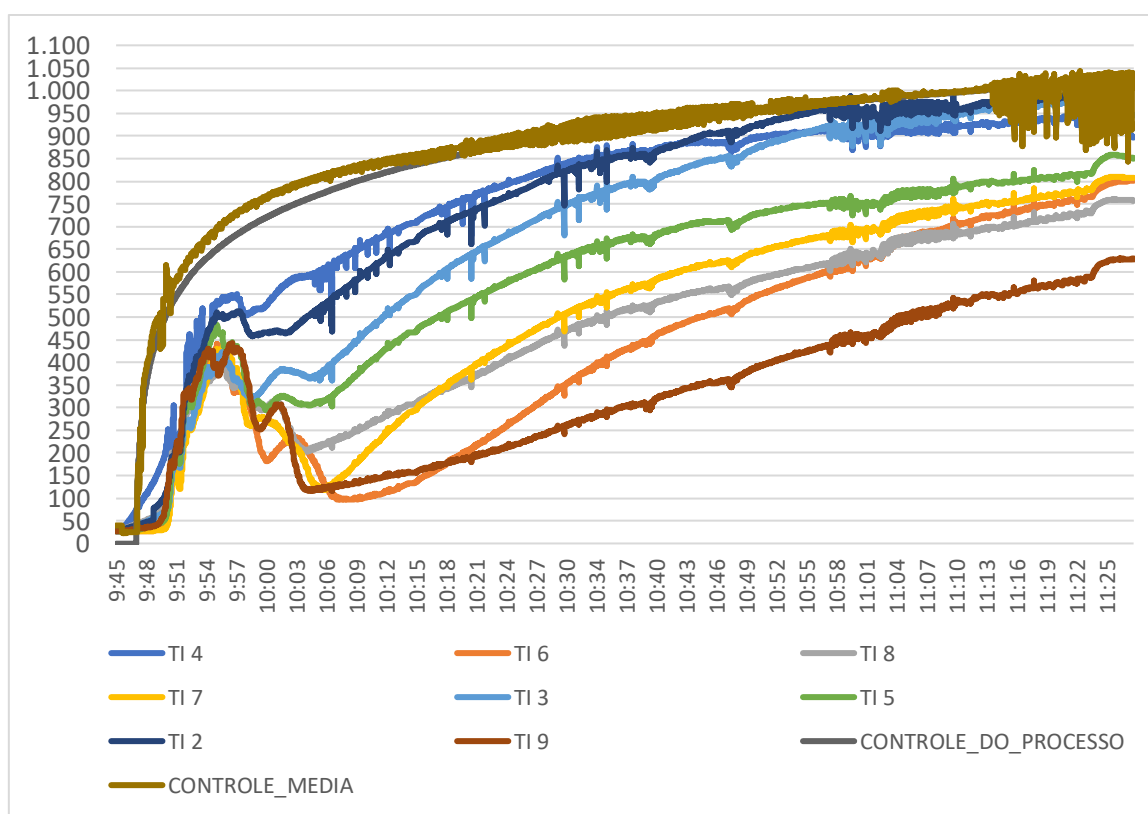
Figura 52: Curva Tempo X Temperatura – Grupo COM FIBRA DE POLIPROPILENO



Fonte: Próprio Autor

Nas Figuras 50 a 52, que correspondem aos revestimentos de maior espessura dentre os escolhidos, observa-se que na parede a temperatura atinge o valor máximo permitido entre 30 e 45 min, melhorando em relação às paredes sem revestimentos, e praticamente dobrando o tempo em relação aos prismas em que a ação fogo atinge as duas faces. Outra verificação bastante importante é que o termopar número 9 (que seria o que ficou dentro do compartimento) para a argamassa tradicional e argamassa de cimento com incorporador de ar, atingiu a temperatura de isolamento térmico aos 60 minutos. Já para a argamassa com adição de fibras chegou aos 75 minutos antes de perder o seu isolamento térmico o que seria, em comparação, 200% mais eficiente.

Figura 53: Curva Tempo X Temperatura – Grupo de TINTA INTUMESCENTE

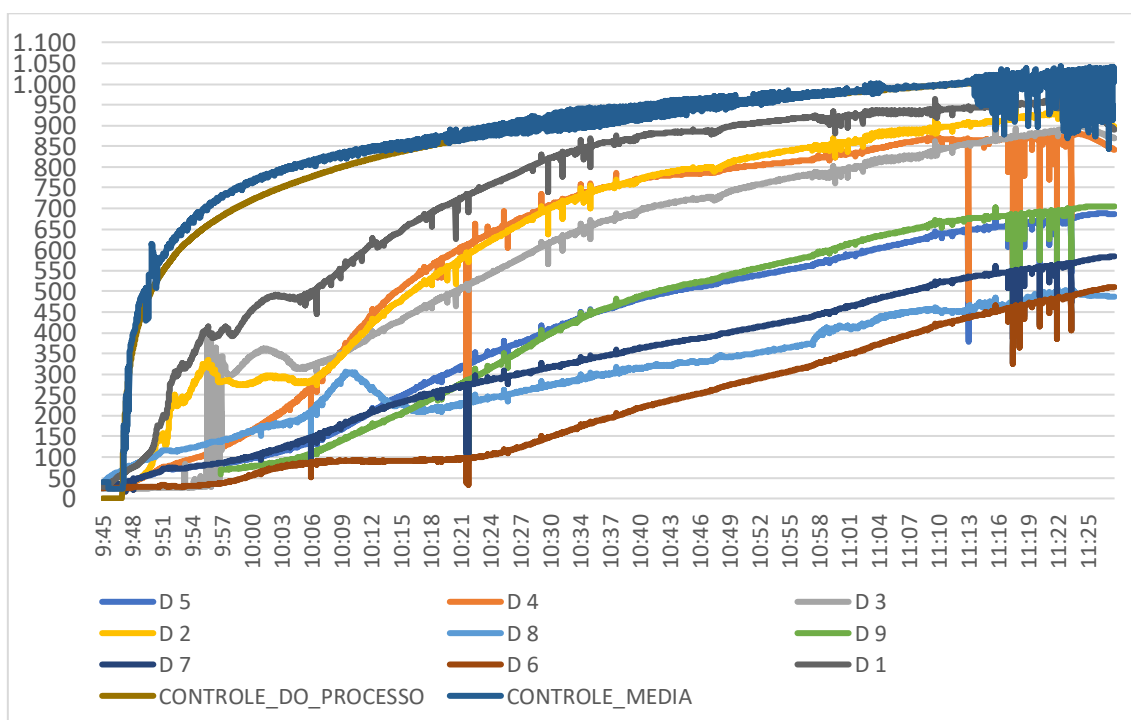


Fonte: Próprio Autor

Como se pode notar na Figura 53, a temperatura máxima permitida é atingida logo nos primeiros 5 minutos de ensaio com posterior queda. Essa

queda foi mais evidente nas pequenas paredes (termopares 4 ao 9), do que nos termopares 2 e 3, que são os que estavam fixados nos prismas. Isso deve se ao fato deles estarem mais perto dos queimadores e não estarem em trios e, portanto, sem compartimentação. Esse fato mostra a ineficiência do material como elemento que propicie o isolamento térmico, quando utilizado como acabamento final, sendo necessário um novo teste com aplicação de outro material como proteção para essa tinta intumescente. Acredita-se que a tinta demore a influenciar, pois depois de um intervalo de tempo a temperatura chega a cair, porém isso não foi eficiente nas condições do ensaio realizado

Figura 54: Curva Tempo X Temperatura – Grupo de DRYWALL



Fonte: Próprio Autor

Percebe-se, na Figura 54, que o material de revestimento dos prismas perdeu aderência rapidamente. Com isso, a temperatura máxima admitida logo foi atingida. Isso deve estar ligado ao sistema de fixação das placas com pinos metálicos, o que teve grande influência. De acordo com o fabricante, as placas de Drywall devem ser pregadas com cola especial para o material, o que foi feito; no entanto, depois de coladas, percebeu-se que as placas não estavam devidamente aderidas, mesmo após 24 horas, tempo indicado pelo fabricante

para a devida secagem. Diante disso, aproveitando a experiência de outros pesquisadores e conversando com técnicos do laboratório e o mestre de obras, optou-se por utilizar os pinos metálicos como fixação adicional, mesmo com o risco de ação do fogo sobre eles. Na Figura 55, é possível perceber que alguns pinos não se perderam por completo, tendo também ficado a marca da cola sob a parede, mesmo após a perda de aderência. Para a resistência residual, esse material foi bastante eficiente como mencionado anteriormente. Contudo, para o isolamento térmico, com 15 minutos de ensaio, a temperatura máxima admitida foi atingida, igualando-se ao grupo de pequenas paredes sem revestimento.

Figura 55: Prisma revestido de Drywall após o resfriamento

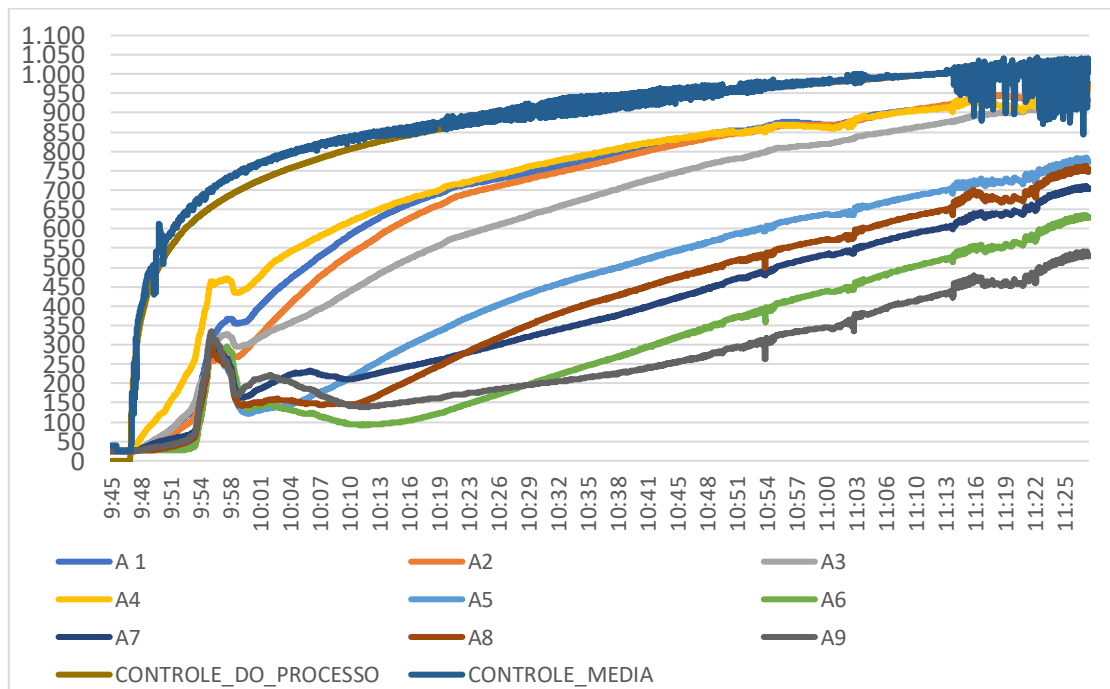


Fonte: Próprio Autor

Os resultados apresentados nas Figuras 56 e 57, mostram que a pequena espessura das argamassas de gesso influenciou na eficiência do isolamento térmico do conjunto, já que a temperatura máxima foi atingida com 10 minutos de ensaio. Depois que a temperatura do forno se estabilizou, a temperatura caiu abaixo dos 180°C, nos pontos 5 ao 9, dos dois conjuntos com argamassa de gesso, que eram os pontos que estavam mais internos à parede, o que comprova que a espessura do revestimento é bastante significativa, uma vez que os pontos A4 e V4, que estavam na borda da parede externa, na face que recebe a chama, foram os pontos de maior temperatura dos conjuntos. Esse fato pode ser

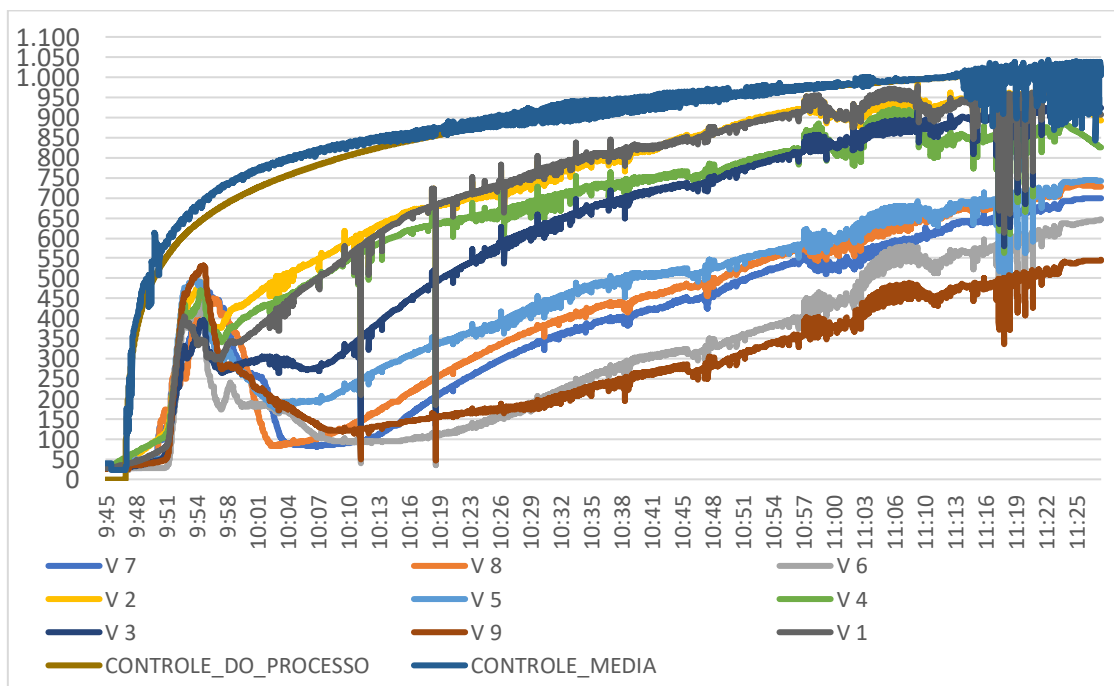
explorado em um novo estudo, aumentando-se a espessura do revestimento para avaliar a sua influência na temperatura inicial, ou se é algo típico do comportamento das argamassas de gesso, associado à grande perda de umidade no início, com posterior estabilização.

Figura 56: Curva Tempo X Temperatura – Grupo de ARGAMASSA DE GESSO COM AREIA



Fonte: Próprio Autor

Figura 57: Curva Tempo X Temperatura – Grupo de ARGAMASSA DE GESSO COM VERMICULITA



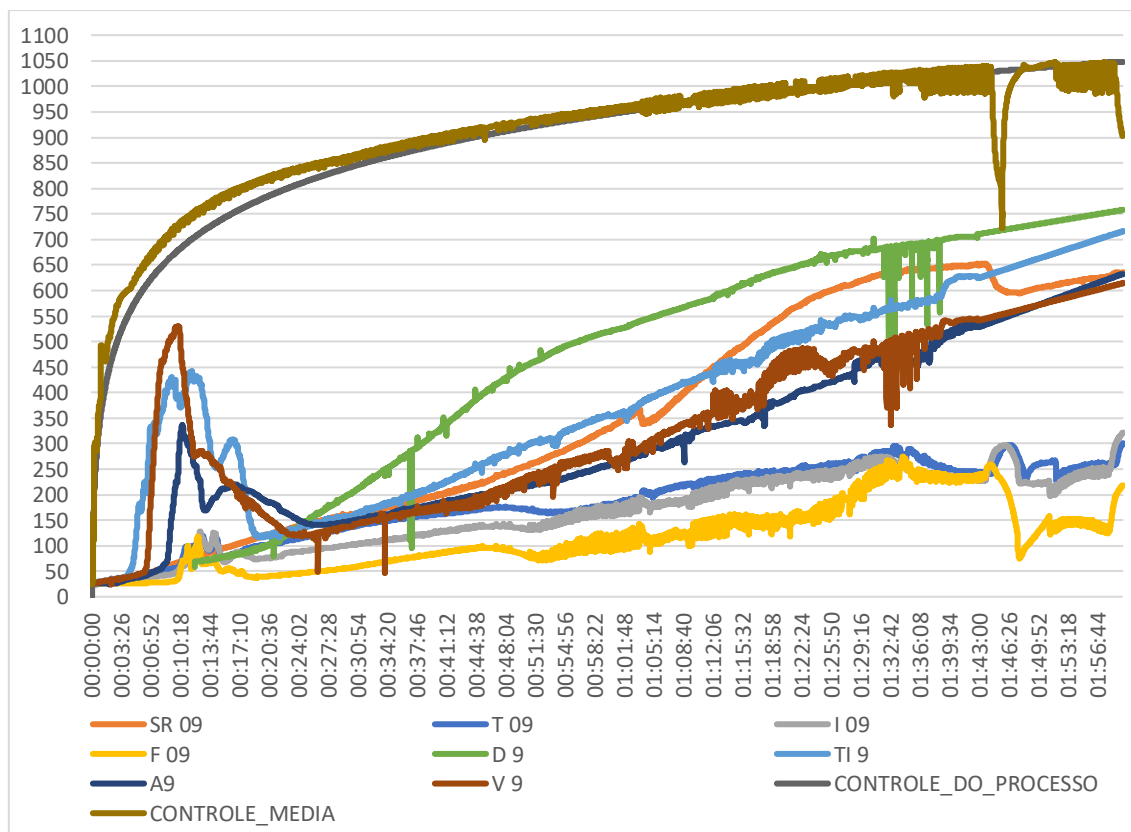
Fonte: Próprio Autor

De forma a resumir o comportamento térmico, percebe-se que todos os conjuntos de prismas por estarem com fogo nas duas faces atingiram a temperatura máxima permitida de 180°C, entre 15 e 30 minutos de ensaio. Já no caso das paredes, a primeira a atingir a temperatura máxima em uma de suas faces foi a do conjunto de argamassa de gesso tanto com areia como com vermiculita, o que deve ser devido à pequena espessura do revestimento.

O conjunto que foi feito com argamassa de cimento com adição de incorporador de ar teve o acréscimo inicial da temperatura mais lento em todas as curvas, o que pode ser explicado por ser essa argamassa mais porosa, fazendo com que os vapores consigam se desprender da parede, com redução interna das tensões térmicas. Um dos fatos de maior interesse do estudo é o ponto interno ao trio para uma melhor análise da compartimentação entre as paredes (representado pelo número 9 nas figuras). Nos gráficos, esse ponto sempre se apresenta com a temperatura mais baixa em relação aos demais do conjunto, tornando evidente a importância do revestimento, comprovada também pelo fato de que o primeiro a atingir a temperatura de 180°C na parte interna foi

o conjunto sem revestimento. Abaixo na Figura 58, é possível ver a comparação entre os termopares 9 de todos os conjuntos:

Figura 58: Curva Tempo X Temperatura – Comparação do termopar de todos os conjuntos da primeira e segunda fornada



Fonte: Próprio Autor

Os conjuntos com revestimento de cimento por possuir uma espessura maior que os demais, fez com que a temperatura interna fosse maior que os demais, comprovando que a espessura do revestimento tem grande influência no aumento da temperatura. O revestimento com adição de fibras de polipropileno, com o aumento da temperatura tem as fibras derretidas e com isso libera poros na argamassa, e o revestimento com incorporador de ar, dissipam as tensões térmicas fazendo com que a temperatura interna melhorasse um pouco mais.

Dentre todos os conjuntos percebe-se que os de argamassa de gesso e tinta intumescente atingiram a temperatura antes das demais, devido à pequena espessura do revestimento, comprovando novamente a sua influência.

As argamassas de gesso, por perderem umidade, tendem a aumentar a temperatura em um primeiro momento, com posterior retorno a uma temperatura aceitável por norma, que seria abaixo dos 180°C. Um estudo mais detalhado que considere o aumento da espessura desse revestimento pode ser que isso não ocorra e a temperatura permaneça abaixo dos 180° C.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho contou com três etapas, sendo que na primeira foram avaliadas as propriedades do elemento principal, que seria a alvenaria estrutural de bloco cerâmico de parede vazada, caracterizado quanto às propriedades geométricas, físicas e mecânicas, além de serem caracterizadas as argamassas de assentamento e revestimento. Depois de todos os elementos caracterizados, foram confeccionados os prismas e as pequenas paredes de alvenaria estrutural tanto os revestidos como os não revestidos. Na terceira etapa, a mais importante da presente pesquisa, foram realizados os ensaios de simulação de incêndio-padrão em prismas e pequenas paredes. Com base no estudo realizado, pode-se às seguintes conclusões:

- De acordo com o ACI/TMS 216.1-14 (2014), paredes com mais de 15,24 cm para bloco vazado, sem preenchimento deveriam suportar 4 horas de tempo requerido ao fogo, em paredes não revestidas. Quando revestidas, esse tempo deveria ser ainda maior. Como os ensaios realizados aqui na pesquisa, os prismas recebem fogo nas duas faces e os trios, possuem uma compartimentação simplificada, esse tempo não foi atingido, porém ficou evidente a contribuição do revestimento, uma vez que o tempo para atingir a temperatura máxima permitida foi maior nos conjuntos que possuíam revestimentos. Destacaram-se aqueles em que a espessura era maior.
- De acordo com a AS 3700 (2011), para o tempo de 2 horas, os blocos cerâmicos não armados, deveriam ter uma espessura mínima de 130 mm. Os resultados aqui obtidos estão bem aquém desse valor. Acredita-se que é devido ao fato de os trios estarem submetidos a elevada temperatura mesmo que indiretamente nas faces internas das paredes, uma vez que a compartimentação é realizada de forma simplificada e não pode ser considerada como 100% garantida.
- Os prismas em todos os conjuntos atingiram o limite de 180°C de maneira rápida, antes dos 20min de ensaio. Isso deve-se ao fato de estarem expostos ao fogo nas duas faces, e posicionados mais próximos dos queimadores dentro do forno.

- Tanto os prismas como as pequenas paredes apresentaram comportamento térmico semelhante quando observadas as curvas de elevação de temperatura.
- Algumas unidades dos elementos de alvenaria estrutural ficaram bastante danificadas, no entanto a maioria, como já mencionado, apenas danificou o revestimento, deixando que as paredes ficassem com poucas fissuras significativas.
- Ficou evidente que revestimentos com espessuras maiores, argamassas à base de cimento, têm maior eficiência para o comportamento térmico em relação àqueles em que a espessura é desprezível, como o caso das argamassas de gesso.
- Alguns revestimentos, como o caso da argamassa de gesso com vermiculita, tiveram o comportamento muito eficiente para a resistência mecânica, embora tenham falhado quanto ao comportamento térmico, atingindo o limite de 180°C com 30 min.
- A compartimentação tem influência significativa, como observado com o termopar 09, mesmo considerando-se que ela foi simulada de forma simplificada com o uso de mantas, como descrito no corpo do trabalho.
- Analisando-se as tabelas 17 e 18, que indicam a resistência residual, e a Figura 58, que mostra a elevação de temperatura do termopar 09 (interno ao trio), o conjunto de maior eficiência é o com revestimento de argamassa tradicional, uma vez que a resistência residual ficou próxima à resistência das paredes e prismas em temperatura ambiente e a elevação de temperatura se deu de forma bem mais lenta que a maioria dos conjuntos. Outro fator relevante é que esse tipo de revestimento é o mais utilizado nas edificações atualmente, sendo que a diferença está na espessura, pois a usual é de 3 cm (nesta pesquisa foi feita com 5 cm).

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste item serão destacados alguns pontos que merecem um detalhamento maior e poderão ajudar em pesquisas futuras.

Um ponto que merece destaque é a preocupação com as condições de contorno dos elementos ensaiados, já que em todos os casos deformações estavam totalmente livres. Verificar o comportamento termomecânico dos elementos de alvenaria, quando carregados juntamente com a elevação de temperatura, é um fator a ser mais bem estudado.

Além das condições de contorno, se faz necessários que sejam testadas novas formas de posicionamento dos corpos de prova dentro do forno, para que a compartimentação seja garantida com maior eficiência.

Nessa pesquisa foram ensaiados corpos de prova com blocos de 6MPa com parede maciça. Outras resistências, bem como outros tipos de blocos, devem ser utilizadas, para a análise da eficiência dos diversos revestimentos.

Destaca-se a importância de novos ensaios variando a espessura das argamassas à base de cimento. Outro ponto a ser avaliado é de revestimentos à base de gesso com vermiculita, alterando os traços para captar a influência dos vazios na resistência residual e no aumento do tempo para atingir o limite da temperatura.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, **ACI/TMS 216.1**: code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies. Michigan, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria, Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2:2017: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria, Parte 2: Métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-2: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos, Parte 2: Execução e controle de obras**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-3: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos, Parte 3: Métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização dos ensaios**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868: Alvenaria estrutural – Parte 3: Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

AUSTRALIAN STANDARDS. **AS 3700 - Masonry structures.** Sydney, 2011.

AYALA, F. R. R. **Mechanical Properties and Structural Behavior of Masonry at Elevated Temperatures.** 2010. 294p. Thesis (Doctor of Philosophy) – Engineering and Physical Sciences, University of Manchester, Manchester. 2010

AZEVEDO, C. C. de A. **Estudo de compósito à base de gesso e vermiculita para isolamento térmica.** 2017. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 998-1 – Specification for mortar for Masonry, Part 1: Rendering and plastering mortar.** Brussels, 2010.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5628-1 –Code of practice for the use of masonry – Part 1: Structural use of unreinforced masonry.** Brussels, 2005.

BUCHANAN, A. H.; ABU, A. K. **Structural design for fire safety.** John Wiley & Sons, 2017. 436p.

BUENO, G. M. **Avaliação da resistência ao fogo de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos com instalações prediais.** 2019. 183 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

CANUT, M.M.C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção.** 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. 154p.

CARVALHO, E. F. T. de. **Estudo da resistência ao fogo do concreto de alto desempenho com metacaulim e adição de fibras**. 2006. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

CARVALHO, P. R. O. **Análise numérica de pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto em situação de incêndio: ênfase no comportamento térmico e termoestrutural**. 2019. 283 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

CENTOFANTE, G.; DAGOSTINI, C. M. Análise das propriedades de argamassas de revestimento com adição de fibras de polipropileno. **Unoesc & Ciência - ACET**, p. 7-16, 6 jun. 2014.

CIRIADES, J. P. **SPALLING - Lascamento Explosivo e Progressivo do Concreto em Situações de Incêndio em Túneis**. 2018. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/spalling-lascamento-explosivo-e-progressivo-do-em-de-ciriades>. Acessado em: 30 de set. de 2019

CKC. **TINTA ANTICHAMAS PARA ALVENARIA**. Disponível em: <https://www.ckc.com.br/index.php/produtos-principal/88-ckc-333-alvenaria.html>. Acesso em: 28 jan. 2021.

COCCO, M. **Análise da ação de altas temperaturas em painéis de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos com diferentes preenchimentos**. 2014. 64 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

CUNHA, J. C.; SILVA FILHO, L. C. P. **Análise da eficiência dos elementos/sistemas de compartimentação vertical com função estrutural submetidos à elevadas temperaturas**. 2013. 28 f. Monografia (Especialização) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/6735/Jeanna%20de%20Campos%20Cunha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em: 01 jun. 2020.

DOLEZELOVÁ, M; SCHEINHERROVÁ, L.; KREJSOVÁ, J.; VIMMROVÁ, A.; **Effects of high temperatures on gypsum-based composites. Construction and Building Materials**, v. 168, p. 82-90. 2018.

DUPIM, R. H. **Resistência residual de compressão de blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto submetidos à situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2019.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1363-2: Fire resistance tests - Part 2: Alternative and additional procedures.** Brussels, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 1: EN 1991-1.1: Actions on structures, Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings.** Brussels, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: EN 1996-1.2: Design of masonry structures, Part 1-2: General rules: Structural fire design.** Brussels, 2005.

FERNANDES NETO, J. A. D. **Estudo experimental do comportamento de elementos de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos em situação de incêndio.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1: Fire resistance tests - elements of building construction: Part 1. General requirements.** Genève, 1999.

JOHN, V. M.; ANTUNES, R. P. N. Argamassas de Gesso. **Ambiente Construído** (São Paulo), Porto Alegre, v. v2, n.1, p. 29-38, 2002.

JORNAL JOVEM PAN. **#SãoPaulo461: Relembre o incêndio no edifício Joelma, marco na história quadricentenária da cidade.** 2015. Disponível em: <https://jovempan.com.br/noticias/relembre-o-incendio-no-edificio-joelma-marco-na-historia-quadricentenaria-de-sao-paulo.html>. Acesso em: 24 fev. 2020.

KIMURA, E. F. A. **Análise termoestrutural de pilares de aço em situação de incêndio.** 2009. 212p. Dissertação (mestrado) - Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 2009.

KREJSOVÁ, J.; DOLEZELOVÁ, M; PERNICOVÁ, R.; SVORA, P.; VIMMROVÁ, A.; **The influence of different aggregates on the behavior and properties of gypsum mortars. Cement and Concrete Composites**, v. 92, p. 188-197. 2018.

LEAL, C. E. F. **Alvenaria estrutural com blocos de concreto: propriedades mecânicas residuais de argamassas, grautes e prismas submetidos a altas temperaturas.** 2023. 382 f. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2023.

LEAL, D. F. **Análise experimental e numérica sobre alvenaria estrutural de blocos de concreto, com e sem revestimento, em situação de incêndio.** 2022. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. doi:10.11606/T.18.2022.tde-30112022-085146. Acesso em: 2024-02-19.

MENEGON, J.; REGINATO, L. A.; LORENZI, A.; GRAEFF, A. G.; SILVA FILHO, L. C. P. **Alvenaria estrutural sob ação de altas temperaturas: Comparação de diferentes blocos através de termografia infravermelha**. 4º Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio. Recife – PE, Brasil, 7p. 2017.

MORENO JUNIOR, A. L.; MOLINA, J. C. Considerações de interesse sobre a avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuições à revisão da NBR 5628. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 37-53, dez. 2012. Fap UNIFESP (SciELO).

NADJAI, A., O'GARA, M., ALI, F. *et al.* **Compartment Masonry Walls in Fire Situations**. *Fire Technol* 42, 211 (2006).

NGUYEN, T. D.; MEFTAH, F. Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. Part 1: Experimental analysis. **Fire Safety Journal**, v. 52, 55-64, 2012.

NUNES, H. M. C. **Modelação da Propagação de Incêndios em Edifícios: Análise do comportamento estrutural em situação de incêndio**. 2015. 202p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2015.

NUNES, J. M. B. **Uma abordagem numérica e analítica para determinação da temperatura e do momento fletor crítico em vigas de aço em situação de incêndio**. 2005. 186p. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

OLIVEIRA, L. A. P. de. Estimativa da resistência ao fogo de paredes de alvenaria pelo critério de isolamento térmico. **Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo**, nº 05, dezembro 1998. p. Disponível em: <http://bt.fatecsp.br/system/articles/26/original/02luizantonio.pdf>. Acesso em: 25 de fevereiro 2020.

OLIVEIRA, M. P. de. **Materiais Compósitos à Base de Gesso Contendo EVA (Etileno Acetato De Vinila) e Vermiculita: Otimização de Misturas e Propriedades Termomecânicas**. 2009. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009

OLIVEIRA, R. B. R.s.; MORENO JUNIOR, A. L.; VIEIRA, L. C. M. Intumescent paint as fire protection coating. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 1, p. 220-231, fev. 2017. FapUNIFESP (SciELO).

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. dos. **O Gesso: produção e utilização na construção civil**. Recife: Bagaço, 2001. 156 p.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO – CORPO DE BOMBEIROS. **Instrução Técnica nº 02:2019 – Conceitos básicos de segurança contra incêndio**. São Paulo, 2019.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO – CORPO DE BOMBEIROS. **Instrução Técnica Nº 08:2019 – Segurança estrutural contra incêndio.** São Paulo, 2019.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO – CORPO DE BOMBEIROS. **Instrução Técnica Nº 09:2019 – Compartimentação horizontal e compartimentação vertical.** São Paulo, 2019.

QUIAO, M.; CHEN, J.; YU, C.; WU, S.; GAO, N.; RAN, Q. Gemini surfactants as novel air entraining agents for concrete. **Cement and Concrete Research.** V 100, p. 40-46, outubro, 2017.

R3D ENGENHARIA. **Paredes Corta-Fogo: antichamas para alvenaria e drywall.** Antichamas para alvenaria e drywall. Disponível em: <http://www.r3dengenharia.com.br/anti-chamas-drywall-parede.html>. Acesso em: 28 jan. 2021.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural.** São Paulo, Pini, 2003. 174p.

REDAÇÃO VEJA SÃO PAULO. **Terreno do Wilton Paes, que desabou em 2018, receberá moradias populares. 2020.** Disponível em: <https://vejasp.abril.com.br/cidades/terreno-wilton-paes-moradias-populares/>. Acesso em: 10 mar. 2020.

REGOBELLO, R. **Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio.** 254 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

RIGÃO, A. O. **Comportamento de Pequenas Paredes de Alvenaria Estrutural Frente a Altas Temperaturas.** Santa Maria, 2012. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, São Maria, 2012.

RODOVALHO, F. S. **Simulação numérica de blocos e prismas de alvenaria em situação de incêndio.** 2018. 166p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

ROMANO, R. C. de O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 289-308, abr. 2018

ROSEMANN, F. **Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico.** 2011. 160 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. Residual mechanical parameters of masonry exposed to fire: a new numerical approach. **Advanced Materials Research**, Estados Unidos, v 1119, p. 700-705, set 2015.

SANTOS SALES, C. A.; GOMES DO NASCIMENTO, C. F.; MARQUES DA SILVA, T.; MARQUES BARRETO, L.; CASADO LORDSLEEM JÚNIOR, A.; DE ALBUQUERQUE SOARES, W.; CASTRO BORGES, P.; BARRETO MONTEIRO, E. C. Fire resistance of ceramic-masonry sealing blocks using intumescent paint protection. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 1, p. 53 - 68, 30 Dec. 2019.

SEITO, A. I. et al. **A segurança contra incêndios no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 484 p.

SILVA, M. G. da; SILVA, V.G da. Painéis de vedação. Painéis de gesso acartonado. **Manual: Instituto Brasileiro de Siderurgia**. Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, 2004. p. 51-59.

SILVA, V. P. **Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2017. v. 1. 238p.

SOARES, M. M. M. **Especificação, execução e controle de alvenaria estrutural em blocos cerâmicos de acordo com a NBR 15812**. 2011. 187 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

SOUZA, R. P. **Avaliação da influência da espessura do revestimento argamassado e do carregamento no comportamento da alvenaria frente a altas temperaturas**. 2017. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2017.

SZNELWAR, J. J.; SCALABRIN, R. **Perfil da Vermiculita**. 2009. 35 p. Disponível em:
http://www.mme.gov.br/documents/36108/448620/P28_RT48_Perfil_da_Vermiculita.pdf/76515275-faba-d03f-46d1-527a254dfe84?version=1.0&download=true. Acesso em: 10 maio 2020.

TANESI, J.; AGOPYAN, Vahan. Compositos reforçados com fibras plásticas para construção civil. **Anais**. São Paulo: EPUSP, 1997.

TAYLOR L. Gypsum chairman of the board. **Industrial Minerals**. Features Editor, n. 439, 2004.p. 38-47.

UGARTE, J. F. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Vermiculita. **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM / MCTI, 2008. p. 865-887.

ZAGO, L. I. **Caos no Edifício Andraus**. 2018. Disponível em: <https://medium.com/@lucasizago/caos-no-edif%C3%ADcio-andraus-452e5a8a247d>. Acesso em: 24 fev. 2020.

